



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Sistema de visión aplicable a la automatización en producción agrícola.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería Mecánica

Opción: Mecatrónica y Sistemas Mecánicos

Presenta:

Ing. Miguel Ángel Salinas Cobián

Asesor:

Dr. Emilio Jorge González Galván

Coasesor:

Dr. Roberto Bartali Marchetti





UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

20 de septiembre de 2018

ING. MIGUEL ÁNGEL SALINAS COBIÁN
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Emilio Jorge González Galván y Roberto Bartali Marchetti**, Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica con orientación terminal en Mecatrónica y Sistemas Mecánicos**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de septiembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Sistema de visión aplicable a la automatización en producción agrícola"

Introducción

1. Antecedentes de automatización de la cosecha de cultivos
2. Sistema de detección de tomates basado en visión por computadora
3. Manipulación en espacio de cámara para sistemas cámara en mano
4. Diseño de herramental para cosecha

Conclusiones

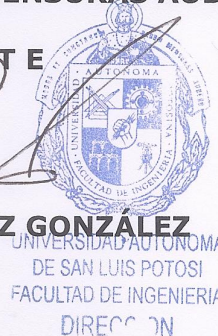
Anexos

Bibliografía

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.



www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Agradecimientos

A mis asesores Emilio Jorge González Galván y Roberto Bartali Marchetti, que han sido mis mentores a lo largo de este trabajo de tesis, por dejarme formar parte de su equipo de trabajo, siempre brindarme apoyo.

A la Facultad de Ingeniería y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de este proyecto.

A todos los doctores del posgrado de ingeniería mecánica por sus enseñanzas y por siempre tener el gusto de compartir su conocimiento.

A mi madre Margarita por apoyarme en todos mis planes de vida y motivarme a seguir con mis estudios de posgrado y a mis hermanos Martín y Manuel que me han guiado a ser una persona de trabajo.

A mis compañeros de generación Ángel, Eduardo, Luis, Omar, Carlos, Juan, Elena, Oscar e Hiram. Por los momentos juntos que pasamos en nuestra estadía en el posgrado, por las altas y bajas que pasó nuestra amistad y por el apoyo brindado incluso más allá de nuestra relación dentro del posgrado. Son los mejores.

A mis compañeros del laboratorio de Robótica y del posgrado de ingeniería eléctrica por aceptarme dentro de su equipo de trabajo y hacer mi estadía muy agradable. Especialmente a Charly, Kike, Alex, David y Adrián que fue con quienes estuve más allegado y de verdad los he llegado a considerar mis amigos.

A mis compañeros del laboratorio de Mecatrónica, Areli, Carolina, Hugo y Antonio por ofrecerme su amistad, sus opiniones y su conocimiento.

A Cinthya Martínez por tu amistad y tu apoyo, además de proveer las fotos de tomates en invernadero utilizadas en esta tesis.

Índice General

Capítulos	Página
Introducción	1
1. Antecedentes de automatización de la cosecha de cultivos	5
1.1. Resumen histórico de la robótica	5
1.1.1. Introducción a la definición de robot	5
1.1.2. Popularización de los robots industriales	6
1.2. Cultivo de tomate en México	8
1.3. Robots usados para aplicaciones dentro del campo de la horticultura	10
1.3.1. Robot recolector de pepinos	10
1.3.2. Robot recolector de tomates	13
1.3.3. Robot recolector de pimientos dulces	16
1.4. Manipulación en espacio de cámara (CSM)	20
1.4.1. Sistema de teleoperación sobre superficies arbitrarias	21

1.4.2. Control en velocidad, basado en visión, de un robot paralelo tipo Delta	25
1.5. Conclusiones del capítulo 1	28
2. Sistema de detección de tomates basado en visión por computadora	29
2.1. Coloración del tomate al momento de la cosecha	31
2.2. Uso de filtros para detección de colores	32
2.3. Obtención de centros geométricos de múltiples objetos en la imagen	36
2.4. Operaciones morfológicas	37
2.4.1. Apertura y cerradura morfológica	37
2.4.2. Aplicación de operaciones morfológicas	38
2.5. Algoritmo para reducción de ruido por el exceso de luz en la imagen binaria	38
2.6. Detección de tomates muy cercanos entre ellos	41
2.7. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de imágenes	42
2.8. Referencia de las coordenadas de los tomates respecto al centro de la imagen	44
2.9. Detección de tomates en invernadero	45
2.10. Conclusiones del capítulo 2	47
3. Manipulación en espacio de cámara para sistemas cámara en mano	49
3.1. Modelo cinemático directo del Robot Fanuc LR Mate 200iC	49
3.2. Metodología de manipulación en espacio de cámara con modelo de cámara lineal	56
3.2.1. Modelo de perspectiva	57
3.2.2. Modelo lineal de manipulación en espacio de cámara	59
3.3. Estimación de la posición tridimensional de un objeto dentro del espacio de cámara	63
3.4. Manipulación en espacio de cámara para un sistema de visión con configuración de cámara en mano	64

3.4.1.	Obtención de un marco de puntos móviles unido al efector final del manipulador	65
3.4.2.	Obtención de puntos 2D fijos a la imagen de las cámaras	69
3.5.	Prueba de la metodología EIH-CSM	70
3.5.1.	Obtención de parámetros de visión	71
3.5.2.	Análisis del error del sistema de visión	74
3.5.3.	Estimación de la posición tridimensional de puntos objetivo	75
3.5.4.	Posicionamiento del robot respecto a puntos objetivo	79
3.6.	Conclusiones del capítulo 3	80
4.	Diseño de herramental para cosecha	83
4.1.	El problema del etileno en hortalizas	83
4.2.	Datos generales de la prueba de compresión de tomates	85
4.3.	Prueba destructiva	89
4.4.	Comportamiento de tomates a diferentes niveles de carga aplicada	92
4.5.	Propuesta del herramental para la recolección de tomates	99
4.6.	Conclusiones del capítulo 4	107
	Conclusiones	109
	Anexos	113
	A. Fotografías de tomates en invernadero	115
	B. Planos de construcción del sujetador recolector de tomates	119
	Bibliografía	123

Lista de Figuras

1.1. Ventas de robots industriales en México.	7
1.2. Precios de los robots comparados con los costos de la mano de obra humana en la década de 1990 (Tomado de [4]).	7
1.3. Suministro mundial anual de robots industriales (Tomado de [6]).	8
1.4. Ambiente de trabajo del robot colector de pepinos (Tomado de [9]).	11
1.5. Fotografía del robot montado en una base sobre rieles (Tomado de [9]).	11
1.6. Componentes del herramental para cosecha del robot colector de pepinos (Modificado de [9]).	12
1.7. Imágenes del sistema de visión aplicando filtros para la detección de pepinos (Tomado de [9]).	12
1.8. Componentes del robot colector de tomates (Modificado de [10]).	13
1.9. Fotografías de la competencia de "Robots de tomate" (Tomado de [10]).	14
1.10. Fotografías de las pruebas realizadas al robot cosechador en un invernadero (Tomado de [10]).	15
1.11. Casos de fallo en la recolección de tomates (Tomado de [10]).	16

1.12. Módulos y componentes del robot recolector de pimientos dulces (Modificado de [11]).	17
1.13. Cámaras usadas en el robot recolector de pimientos dulces (Modificado de [11]).	17
1.14. Detección de pimientos rojos por medio del sistema de visión (Tomado de [11]).	18
1.15. Herramientas diseñadas para la recolección de pimientos dulces (Modificado de [11]).	19
1.16. Diagrama de sistema de teleoperación (Tomado de [20]).	21
1.17. Puntos muestra que definen el espacio de estimación paramétrica (Tomado de [20]).	22
1.18. Led montado en el efector final del robot Fanuc LR Mate 200iC (Tomado de [20]).	22
1.19. Proyección de puntos generados por láser en la superficie (Tomado de [20]). .	23
1.20. Trayectorias descritas por el dispositivo maestro y esclavo sobre una superficie plana (Tomado de [20]).	24
1.21. Trayectorias descritas por el dispositivo maestro y esclavo sobre una superficie esférica (Tomado de [20]).	24
1.22. Trayectorias descritas por el dispositivo maestro y esclavo sobre una superficie arbitraria (Tomado de [20]).	24
1.23. Esquema de control CSM en velocidades (Tomado de [21]).	25
1.24. Vista isométrica de la distribución de los puntos usados a lo largo de una trayectoria planeada [21].	26
1.25. Led montado en el efector final del robot Delta Parallax LKF-2040 [21]. . . .	26
1.26. Error en la posición del efector final respecto a un punto objetivo con una velocidad de banda de 7 cm/s (tomado de [21]).	27
2.1. Proceso de separación de objetivos (Modificado de [24])	30
2.2. Proceso de maduración de los tomates (Tomado de [28]).	32
2.3. Conformación de una imagen RGB (Modificado de [29]).	33

2.4. Representación gráfica de los valores H, S y V que conforman una imagen a color (Modificado de [30]).	34
2.5. Proceso de transformación de imagen de RGB a binaria.	35
2.6. Resultado del uso de filtro "Canny" y del algoritmo de detección de centroides.	36
2.7. Binarización de una imagen en un entorno real.	37
2.8. Imagen de prueba binarizada.	38
2.9. Detección de tomates en imagen prueba.	39
2.10. Proceso de detección de zonas con altos niveles de luz en la superficie de los tomates.	40
2.11. Imagen invertida sumada a la imagen binaria original.	40
2.12. Detección de tomates sin eliminar contornos.	41
2.13. Detección de tomates eliminando contornos.	42
2.14. Diagrama de flujo del sistema de detección de tomates.	43
2.15. Sistemas coordenados de trabajo en la imagen.	44
2.16. Diagrama de programación de los diferentes casos.	45
2.17. Detección exitosa de tomates en invernadero.	46
2.18. Detección errónea de tomates en invernadero.	46
3.1. Robot Fanuc LR Mate 200iC.	50
3.2. Diagrama utilizado para la obtención del modelo cinemático del robot industrial.	51
3.3. Configuración de paralelogramo en la segunda junta del robot Fanuc LR Mate 200iC (Modificado de [2]).	54
3.4. Pasos a seguir de la metodología de manipulación en espacio de cámara.	57
3.5. Sistema de referencia unido a la cámara (Tomado de [38]).	58
3.6. Comparación entre configuraciones cámara en mano y cámara fija (Tomado de [40]).	65
3.7. Marco de tres planos colocado dentro del espacio de trabajo del robot.	66

3.8. Ubicación de los sistemas coordenados en la base del robot y en efector final del robot.	67
3.9. Simulación del espacio móvil unido al efector final.	68
3.10. Espacio de visión ocupado en las cámaras.	69
3.11. Centros geométricos de los puntos muestra.	70
3.12. Cámara Logitech c270.	71
3.13. Gráfica de puntos medidos contra estimados.	75
3.14. Puntos objetivos observados por las cámaras.	76
3.15. Ubicación del centro geométrico de la esfera 1 en ambas cámaras para la primera configuración del robot.	77
3.16. Ubicación del centro geométrico de la esfera 2 en ambas cámaras para la segunda configuración del robot.	78
3.17. Diagrama de bloques del sistema de control por visión.	79
3.18. Posición cercana al objetivo dada al robot.	79
3.19. Medición de la separación entre el efector final del robot y las esferas.	80
4.1. Sensor de fuerza Fanuc FS-10iA.	85
4.2. Sensor de fuerza Fanuc FS-10iA montado en el extremo del robot.	85
4.3. Ubicación del tomate debajo del efector final.	86
4.4. Diagrama utilizado para la obtención de la deformación unitaria del tomate.	87
4.5. Posición inicial y final de la prueba de destrucción de tomates	89
4.6. Gráfica de fuerza medida por el sensor contra desplazamiento del efector final.	90
4.7. Gráfica del esfuerzo promedio contra deformación de los tomates 1, 2 y 3.	90
4.8. Tomates 1, 2 y 3 posterior de la prueba destructiva.	91
4.9. Prueba de aplicación de diferentes niveles de carga.	92
4.10. Curvas de fuerza del sensor contra desplazamiento del robot.	93
4.12. Tomate 5 deformado.	94

4.11. Tomates 5, 7 y 8 posterior de la prueba destructiva.	95
4.13. Tomate 7 deformado.	96
4.14. Tomate 8 deformado.	97
4.15. Curva típica de relajación de un tomate en estado torneado usando un punzón de 4 mm (Tomado de [28]).	98
4.16. Mano robótica base para el diseño del herramental (Tomado de [47]).	99
4.17. Dedo y tren de engranes en el que se basó el diseño del herramental recolector de tomates (Tomado de [48]).	100
4.18. Diagrama cinemático de dos grados de libertad del dedo usado en [48].	100
4.19. Diagrama cinemático auxiliar del mecanismo del pulgar de la mano mecánica.	101
4.20. Red topológica del mecanismo del pulgar.	102
4.21. Simulación del mecanismo del dedo.	105
4.22. Simulación del sujetador.	105
4.23. Acoplamiento de los dedos del gripper y el tornillo sin fin.	106
4.24. Modelo del efector final para la recolección de tomates.	106
4.25. Simulación del sujetador abierto y cerrado.	107
A.1. Universidad Politécnica de Baja California.	115
A.2. Fotografías extra de tomates en invernadero (Parte 1).	116
A.3. Fotografías extra de tomates en invernadero (Parte 2).	117
A.4. Fotografías extra de tomates en invernadero (Parte 3).	118
B.1. Dibujo de explosionado del gripper.	120
B.2. Vistas del gripper abierto.	121
B.3. Vistas del gripper cerrado.	122

Lista de Tablas

1.1. Error medio en la estimación paramétrica.	22
2.1. Valores de Matiz de colores básicos (Tomado de [27]).	31
2.2. Valores de Matiz de colores básicos.	34
2.3. Rango de valores de Matiz, Saturación y Valor.	34
2.4. Valores de Matiz de colores básicos.	45
3.1. Longitudes de los eslabones del robot industrial.	51
3.2. Valores de junta del robot para cada configuración.	68
3.3. Posición y orientación del extremo del robot.	68
3.4. Coordenadas x, y, z , de los puntos muestra respecto a la base del robot. . . .	71
3.5. Valores de junta del robot.	72
3.6. Coordenadas x, y, z de los puntos muestra respecto al sistema en el efector final.	72
3.7. Coordenadas x_c, y_c del centro geométrico de cada punto muestra.	73
3.8. Parámetros de visión de las cámaras en el efector final.	73

3.9. Comparación de coordenadas tridimensionales medidas contra calculadas. . .	74
3.10. Resultados del error del sistema de visión.	74
3.11. Valores necesarios para la estimación de la posición de un objetivo respecto a la base del robot.	77
3.12. Valores necesarios para la estimación de la posición de un objetivo respecto a la base del robot.	77
3.13. Coordenadas 3D de puntos objetivos respecto al efector final.	78
3.14. Coordenadas tridimensionales de puntos objetivos respecto a la base del robot.	78
4.1. Clasificación de especies hortícolas de acuerdo a la producción de etileno (Tomado de [43]).	84
4.2. Peso y Tamaño de los tomates sometidos a compresión.	86
4.3. Tipos de daño al tomate y rangos de esfuerzo donde se presentan.	97
4.4. Longitudes que componen cada eslabón en el diagrama cinemático auxiliar del pulgar.	101
4.5. Magnitudes propuestas para las longitudes del mecanismo del pulgar.	104

Introducción

El presente trabajo se centra en el desarrollo de un sistema de visión cámara en mano con aplicación en el cultivo de hortalizas (específicamente tomates) en invernadero. Dicho sistema se basa en la metodología de control por visión de Manipulación de Espacio de Cámara (CSM), la cual ha sido usada para el desarrollo de múltiples proyectos de posicionamiento y manejo de materiales en espacios estructurados y no estructurados. A diferencia de otras metodologías que manejan un sistema de control en lazo cerrado y hacen uso no solamente del modelo cinemático del robot, sino también del Jacobiano, CSM maneja un esquema en lazo abierto usando técnicas de estimación y aprovechándose únicamente del modelo cinemático directo del robot.

Motivación

Actualmente la robótica comienza a tener impacto en aplicaciones enfocadas a la horticultura. Muchos de los sistemas aplicados en la horticultura tienen que ver con el proceso de recolección y manejo del fruto. Así mismo, estos sistemas automatizados se basan en esquemas de control por visión y tratamiento de imágenes para la identificación y localización del objetivo. El hecho de cada vez existan más proyectos de este tipo habla de que la robótica ha dejado de centrarse únicamente en procesos industriales realizados dentro de espacios controlados.

La motivación principal de este trabajo es desarrollar un sistema de visión capaz de mejorar el rendimiento de procesos de recolección de hortalizas en invernaderos. Esto debido a que, a lo largo de las últimas décadas, se ha buscado hacer más con menos recursos; en este caso agua, suelo, tiempo, que cada vez son más limitados debido a la sobrepoblación y a que existe una demanda creciente de alimento en el mundo.

Por otro lado, la escasez de mano de obra y el alto costo asociado a ésta, plantean diversos desafíos en producción agrícola. Solamente en California, el 71 % de los productores reconoce tener problemas en esta área, dejando a un quinto de los agricultores sin posibilidad de terminar sus cosechas por no contar con el personal que realice este tipo tareas [1]. Estos y muchos más casos, constituyen la base del planteamiento del problema en esta tesis.

Planteamiento del problema

Diversos estudios realizados dentro del campo de la horticultura sugieren que el uso de tecnología robótica y de visión por computadora es una solución viable para la disminución de gastos en mano de obra para la recolección de hortaliza cultivada en invernadero.

La hortaliza que se propone recolectar es tomate que, cultivado en condiciones “orgánicas”, alcanza un precio más elevado que justifica el empleo de técnicas de cosecha más selectivas. La automatización del proceso de recolección juega un papel clave en mejorar la productividad agrícola, aumentar la calidad de los cultivos y reducir los costos de mano de obra.

La recolección de cultivos de alto valor dentro de la horticultura exige todavía una gran inversión en mano de obra debido a la destreza necesaria para lograr el trabajo. Por estas razones, automatizar la tarea de recolección de hortalizas es de gran interés para las industrias hortícola y robótica.

Objetivos de la Tesis

Objetivo general

Desarrollo de un sistema de visión aplicable a la recolección de cultivos en invernaderos.

Objetivos particulares

- Desarrollo del sistema de visión cámara en mano bajo la metodología de manipulación de espacio de cámara.
- Análisis, evaluación y validación experimental del sistema de visión.
- Desarrollo del algoritmo de visión por computadora para la detección de tomates en invernadero.
- Diseño del herramental para la cosecha de cultivos.

Metodología

Se plantea primeramente una revisión bibliográfica de robots automáticos dentro del campo de la horticultura, así como la verificación de técnicas usadas para la localización de tomates. Como segunda tarea se tiene el estudio de la metodología de manipulación en espacio de cámara y sus diversas variantes, esto con el fin de elegir el método más adecuado para el desarrollo del sistema de visión cámara en mano. Posteriormente se desarrolla el algoritmo de visión para la detección y localización de tomates en invernadero y su implementación dentro del sistema de visión cámara en mano.

Para el diseño del herramental se inicia con pruebas destructivas de tomates que determinen el daño dependiendo de la carga aplicada. Con base en los resultados obtenidos se realiza el diseño de un herramental para la cosecha de tomates.

Para finalizar se propone la escritura de un artículo y el documento de tesis.

Contenido de los capítulos

A continuación se menciona un breve resumen del contenido de los capítulos incluidos en el presente trabajo:

- **Capítulo 1:** Se empieza por la definición de robótica, el desarrollo de ésta y el impacto que ha tenido en el mercado desde la década de los ochenta. Se muestran trabajos previos de robots automatizados dentro del campo de la horticultura y para finalizar, se explican brevemente trabajos realizados bajo la metodología de manipulación en espacio de cámara.
 - **Capítulo 2:** Se describe el algoritmo creado para la detección de tomates en invernadero, las funciones usadas y se hace un análisis de diversas fotos tomadas en un invernadero dando como resultado un porcentaje de efectividad del algoritmo de visión. Además, se describen ventajas y casos de fallo de este algoritmo.
 - **Capítulo 3:** Se explica lo que es el modelo lineal de manipulación en espacio de cámara (LCM-CSM). Se propone el método de manipulación en espacio de cámara para sistemas de visión cámara en mano (EIH-CSM), se ejecuta la propuesta y se evalúa el error del sistema usando puntos muestra y puntos objetivo.
 - **Capítulo 4:** Se plantean dos pruebas de compresión de tomates (prueba destructiva y prueba de recuperación) para cuantificar el daño producido en éstos, dependiendo del grado de esfuerzo aplicado y se hace una primera propuesta del diseño del mecanismo para la recolección de hortalizas basado en el pulgar de una mano robótica.
 - **Conclusiones:** Para finalizar se presentan las conclusiones generales a las que se llegó con el desarrollo del presente trabajo de tesis y además el trabajo a futuro para continuar con este proyecto de investigación.
-

Antecedentes de automatización de la cosecha de cultivos

1.1. Resumen histórico de la robótica

1.1.1. Introducción a la definición de robot

La palabra robot fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el novelista y autor dramático checo Karel Capek (1890-1938) estrena en el teatro de Praga su obra Rossum's Universal Robot (R.U.R), en cuyo idioma la palabra “robota” se refiere al trabajo de manera forzada. Los robots de R.U.R. eran máquinas androides fabricadas a partir de la fórmula obtenida por un brillante científico llamado Rossum; estos robots servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana a excepción de uno de sus creadores, con la frustrada esperanza de que les enseñe a reproducirse [2].

Desde su aparición, este término ha sido aplicado en una gran variedad de dispositivos, algunos ejemplos son robots teleoperados, vehículos bajo el agua, robots exploradores autónomos, etc. y básicamente cualquier cosa que llegue a operar con algún grado de autonomía, frecuentemente bajo control computacional, es asociado con la palabra robot.

Una definición oficial para robot viene de la Robotics Industries Association (RIA): Un robot es un manipulador reprogramable y multifuncional, diseñado para mover material, partes, herramientas o dispositivos especializados mediante variables de movimiento programadas para la realización del proceso que conllevan las tareas.

El elemento clave de la definición anterior es la programabilidad de los robots. Es la computadora la que da la utilidad y la capacidad de adaptabilidad al robot. Así que la llamada revolución de la robótica, es de hecho, parte de la gran revolución de las computadoras.

El robot, tal como se ha definido, nació de la unión de dos tecnologías previas: Robots teleoperados y máquinas de control numérico. Los robots teleoperados, o dispositivos maestro-esclavo, se desarrollaron durante la segunda guerra mundial para manejar materiales radiactivos. El control numérico computarizado (CNC) se desarrolló debido a la alta precisión requerida en el maquinado de ciertos elementos, tales como componentes de aeronaves de alto rendimiento. Los primeros robots combinaban, en esencia, los acoplamientos mecánicos de los robots teleoperados con la autonomía y programabilidad de las máquinas de CNC.

Las primeras aplicaciones de los robots manipuladores se basan en actividades de movimiento de material, tales como moldes de inyección o estampados. Estos robots eran programados para realizar una serie de actividades como mover objetos (sujetándolos por medio de un herramental) de una posición A, a una posición B. Actividades como soldadura, rectificado, ensamblaje, requieren no solamente un movimiento más complejo, sino también alguna clase de sensores externos tal como un sistema de visión, un sistema táctil, o sensores de fuerza, debido a la interacción del robot con el medio en que se desenvuelve.

Cabe señalar que las aplicaciones importantes de los robots no solamente son trabajos industriales en los que el robot está sustituyendo directamente la mano de obra. Hay muchas otras aplicaciones de la robótica en áreas donde el uso de seres humanos es poco práctico o indeseable. Entre éstas se encuentran la exploración planetaria, la recuperación y reparación de satélites, la desactivación de dispositivos, y el trabajo en entornos radiactivos. Por último, las prótesis, como miembros artificiales, son dispositivos robotizados que requieren métodos de análisis y diseño similar al de los manipuladores industriales [3].

1.1.2. Popularización de los robots industriales

En los Estados Unidos hubo mucho auge en la adopción de equipo de robótica a principios de la década de 1980 y a partir de ese momento el mercado ha ido creciendo (Figura 1.1), aunque está sujeto a las variaciones económicas como pasa con todos los mercados.

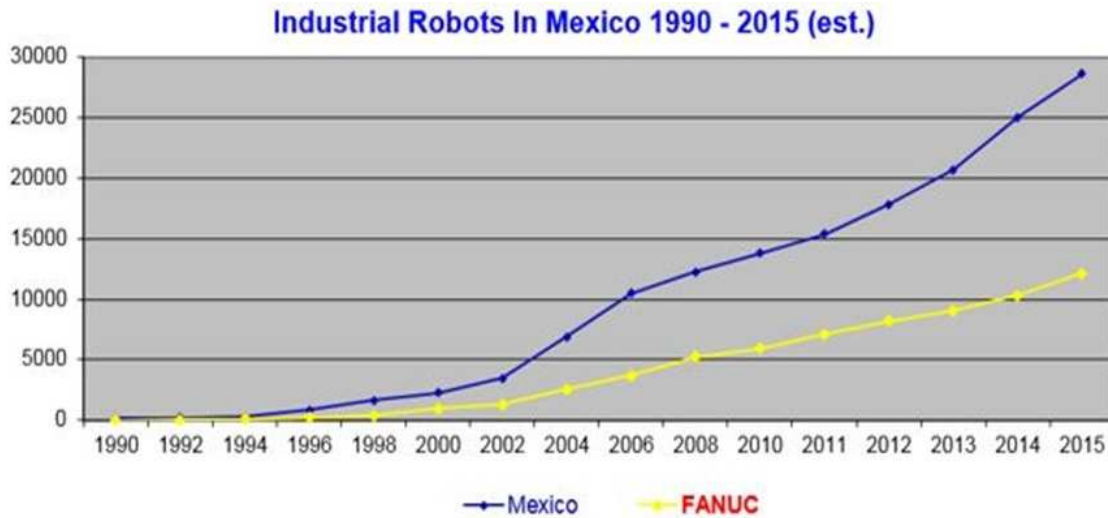


Figura 1.1. Ventas de robots industriales en México.

Una de las principales razones del crecimiento en el uso de robots industriales es la reducción en su costo. En la Figura 1.2 se indica que, durante la década de 1990, los precios de los robots disminuyeron al mismo tiempo que aumentaron los costos de mano de obra humana. Además, los robots no sólo se están volviendo más baratos, sino también más efectivos: más rápidos, precisos y flexibles [4].

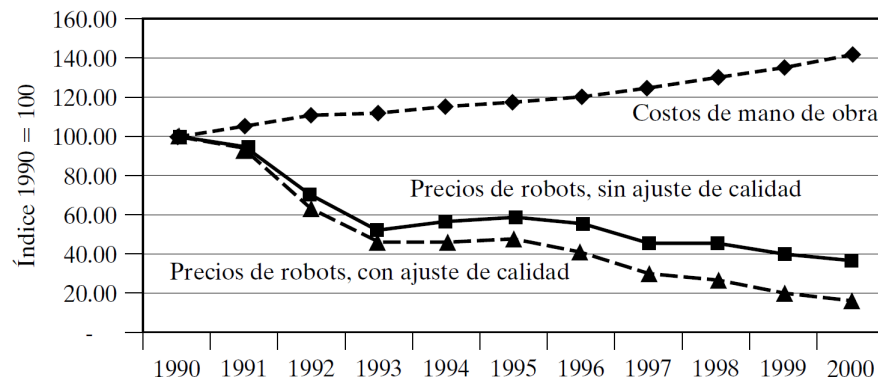


Figura 1.2. Precios de los robots comparados con los costos de la mano de obra humana en la década de 1990 (Tomado de [4]).

En 2018 el número de robots industriales vendidos en todo el mundo superó la marca de 380.000 unidades por primera vez en la historia. Según el estudio de mercado de IFR (International Federation of Robotics) esto corresponde a un crecimiento global de año en

año de un 15 % teniendo la mayor demanda en la industria de automotriz.

Los robots articulados son, por mucho, el tipo de robot más vendido. La amplia gama de aplicaciones en las que se despliegan, junto con la amplia gama de modelos disponibles, ha ayudado a impulsar las ventas de este tipo de robot en todas las regiones a más de 350.000 unidades en 2018 [5].

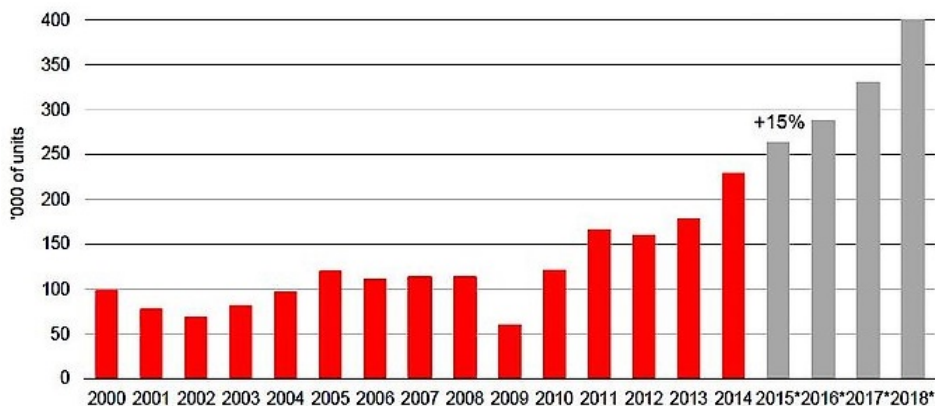


Figura 1.3. Suministro mundial anual de robots industriales (Tomado de [6]).

La gran importancia que han tenido los robots manipuladores en la industria es debido a su capacidad de realizar tareas repetitivas en menor tiempo y al bajo costo que han tenido los últimos años en el mercado. Estas características han llevado a los robots industriales a ámbitos fuera de lo industrial, tal es el caso de la horticultura.

1.2. Cultivo de tomate en México

Los nuevos métodos de cultivo y la creciente demanda de hortalizas han promovido enormemente la producción mundial de tomate rojo. Se registra que el volumen de cosecha a nivel mundial, el consumo total y el consumo promedio per cápita presentan una tendencia de crecimiento durante la década actual. China se mantiene como el mayor productor y consumidor. Estados Unidos es el principal importador mundial y México es el principal proveedor de tomate para ese país.

Según estudios la producción de tomate en México creció a una tasa promedio anual de

3.3 por ciento entre 2005 y 2015, para ubicarse en 3.1 millones de toneladas. La superficie total destinada a este cultivo disminuyó a una tasa promedio anual de 3.8 por ciento. En 1980 se sembraron 85,500 hectáreas, en 2000 se sembró un área de 75,900 hectáreas y en 2015 se sembraron 50,596 hectáreas. La disminución en la superficie sembrada se debe a que se siembra cada vez menos en cielo abierto, mientras que el cultivo en condiciones de agricultura protegida (malla sombra e invernaderos) continúa en crecimiento constante. Así, el volumen de tomate rojo cultivado en ambientes controlados pasó del 2.9 por ciento en 2005 a 32.2 por ciento en 2010, y hasta 59.6 por ciento del volumen total en 2015.

La productividad del tomate por unidad de superficie continúa creciendo. Los rendimientos en cultivo varían dependiendo de las tecnologías que se empleen en esta tarea, desde el cultivo a cielo abierto, hasta la producción en invernaderos automatizados en riego y cosecha. Las inversiones para la agricultura en entornos controlados están orientadas a la rentabilidad del cultivo destinado a ser exportado.

La producción de tomate en México esta liderada por cinco entidades en las cuales se produjo el 54.1 por ciento del total nacional en 2015: Sinaloa (27.4 por ciento), Michoacán (7.2 por ciento), San Luis Potosí (7.2 por ciento), Baja California (7.1 por ciento) y Jalisco (5.2 por ciento).

Esta hortaliza mantiene su importancia en el comercio exterior agropecuario del país, mientras continúa registrando un dinamismo sobresaliente. En 2015 fue el principal producto primario en cuanto al valor de las exportaciones, que creció a una tasa promedio anual de 6.5 por ciento, mientras que el volumen lo hizo a una tasa promedio anual de 4.7 por ciento durante la última década. El volumen exportado, de 1.43 millones de toneladas, fue equivalente al 53.3 por ciento de la producción nacional de esta hortaliza en 2015, y el 99.3 por ciento de las ventas de tomate mexicano se destinó a Estados Unidos.

En el mercado nacional, los precios del tomate dependen del tipo de producto (orgánico, producido en invernadero o en cielo abierto, etc.) y de la variedad, principalmente. Además de posibles daños al cultivo por fenómenos meteorológicos, la estacionalidad de la producción, así como el flujo de las exportaciones, repercuten de manera importante en la disponibilidad del producto en el mercado nacional, y por lo tanto, en la volatilidad de los precios de esta hortaliza [7].

Una de las tareas dentro del proceso de producción de tomate que requiere más tiempo y a la vez mano de obra, es la recolección de estos cultivos y una de las propuestas más comunes para reducir los tiempos de recolección sin tener que aumentar drásticamente los recursos invertidos, es el uso de robots.

1.3. Robots usados para aplicaciones dentro del campo de la horticultura

Los robots son comúnmente utilizados en la manufactura de productos de alimentación, pero aún son poco frecuentes en el campo abierto o en los invernaderos. Sin embargo, la tecnología robótica aplicada al sector agrícola se encuentra en un estado de desarrollo avanzado, con algunas realizaciones ya plenamente comerciales y otras validadas a nivel de prototipo. La inminente necesidad de aumentar la producción sin aumentar los recursos y minimizando el impacto ambiental, demanda, tal vez de manera inexorable, dar el paso de la mecanización a la automatización de la agricultura, en donde la robótica agrícola tendrá un protagonismo destacado [8].

La mayoría de los robots manipuladores utilizados para la recolección de cultivos son usados en invernaderos donde el ambiente es fácil de controlar. De esta manera se evita el exceso de polvo en las juntas, el desgaste causado por el sol y además efectos negativos que pueda causar la lluvia sobre estos. Algunos de los casos de robots manipuladores usados en invernaderos se mencionan a continuación.

1.3.1. Robot recolector de pepinos

El artículo [9] describe el concepto de un robot autónomo para la recolección de pepinos en invernaderos. Se describe el ambiente de trabajo del robot y la logística de la cosecha. Se afirma que para un vivero holandés de 2 ha, se necesitan 4 robots de cosecha y una estación de acoplamiento durante la temporada alta.



Figura 1.4. Ambiente de trabajo del robot colector de pepinos (Tomado de [9]).

Basándose en estos preliminares, se definen las especificaciones de diseño del robot de cosecha. El requisito principal es que una sola operación de cosecha puede tomar como máximo 10 s.

El artículo se centra en los componentes individuales de hardware y software del robot. Estos incluyen; el vehículo autónomo, el manipulador, el efector final, los dos sistemas de visión por ordenador para la detección y la imagen 3D de la fruta y el medio ambiente y, finalmente, un esquema de control que genera movimientos sin colisión para el manipulador durante la cosecha.

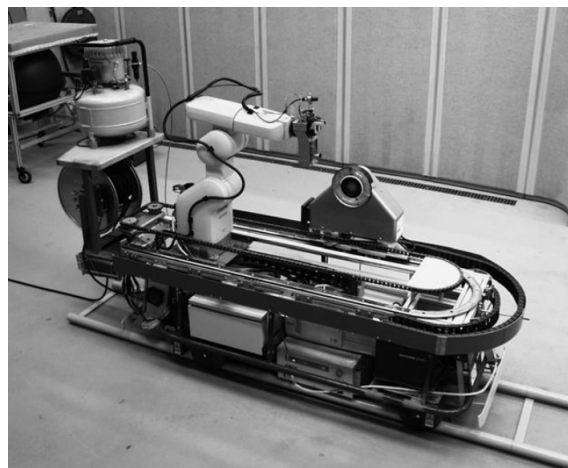


Figura 1.5. Fotografía del robot montado en una base sobre rieles (Tomado de [9]).

El manipulador tiene siete grados de libertad. Esto es suficiente para la tarea de recolección. El efector final está diseñado de tal manera que maneja la fruta suave sin pérdida de calidad.

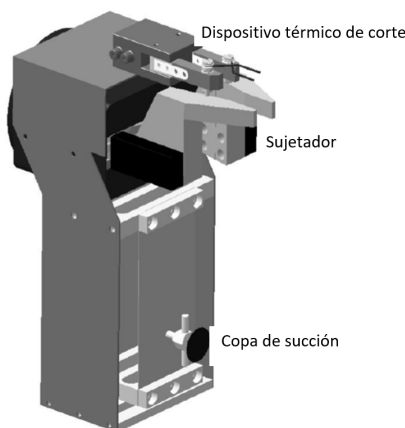


Figura 1.6. Componentes del herramienta para cosecha del robot colector de pepinos (Modificado de [9]).

La copa de succión en el efector final se utiliza para dar estabilidad al pepino a la hora de cortarlo de la planta y el dispositivo de corte térmico incluido en el efector final previene la propagación de enfermedades a través del invernadero.

El sistema de visión por computadora es capaz de detectar más del 95 % de los pepinos en un invernadero. Utilizando modelos geométricos se determina la madurez de éstos.



Figura 1.7. Imágenes del sistema de visión aplicando filtros para la detección de pepinos (Tomado de [9]).

En varias pruebas realizadas al sistema de visión, las ramas o las hojas eran confundidas con pepinos pero estos errores eran debido a la poca iluminación que había durante la realización de pruebas.

Del artículo se pueden tomar datos de interés para la realización del presente proyecto de tesis.

- Robot de 7 grados de libertad.
- Robot montado en una base sobre rieles.
- Uso de dispositivo térmico para corte del pedúnculo del pepino.
- Uso de una copa de succión para estabilización y sujeción del pepino.
- 80 % de éxito en el proceso de cosecha en un tiempo estimado de 45 segundos por pepino.
- El sistema de visión reconoce el pepino en un 95 % de las pruebas.
- Uso de cámaras montadas en el efector final.

1.3.2. Robot recolector de tomates

En [10] se presenta un robot autónomo de recolección de tomate y los resultados de su participación en un concurso de cosecha. El robot consta de una cámara stereo que puede medir la profundidad en corto alcance, un brazo articulado sobre una base móvil y un sujetador capaz de arrancar tomates utilizando una articulación rotativa.

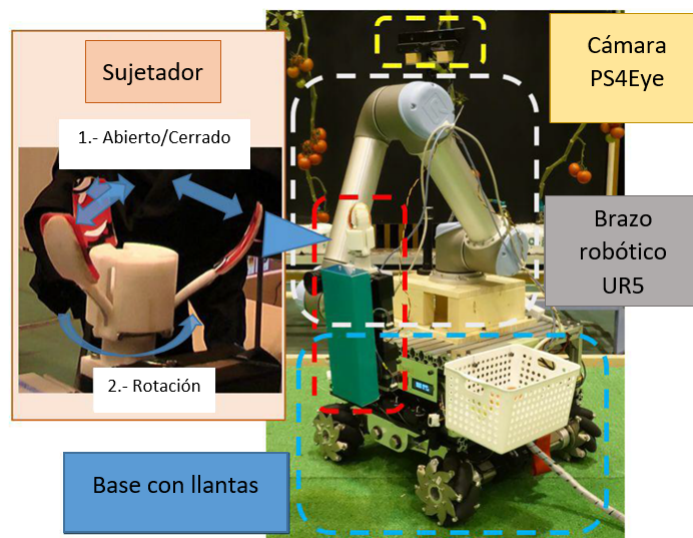


Figura 1.8. Componentes del robot colector de tomates (Modificado de [10]).

En la competencia de robot de tomate, el robot cosechó tomates individuales y tomates en racimos, la velocidad promedio de cosecha fue de 80 seg/fruta y la tasa de éxito fue de alrededor del 60 %.

En la Figura 1.9 se puede observar las distintas etapas que realiza el robot durante la tarea de recolección de tomate a lo largo de la competencia. Las primeras seis fotografías son del posicionamiento del robot y las últimas cuatro son del corte y recolección del tomate.

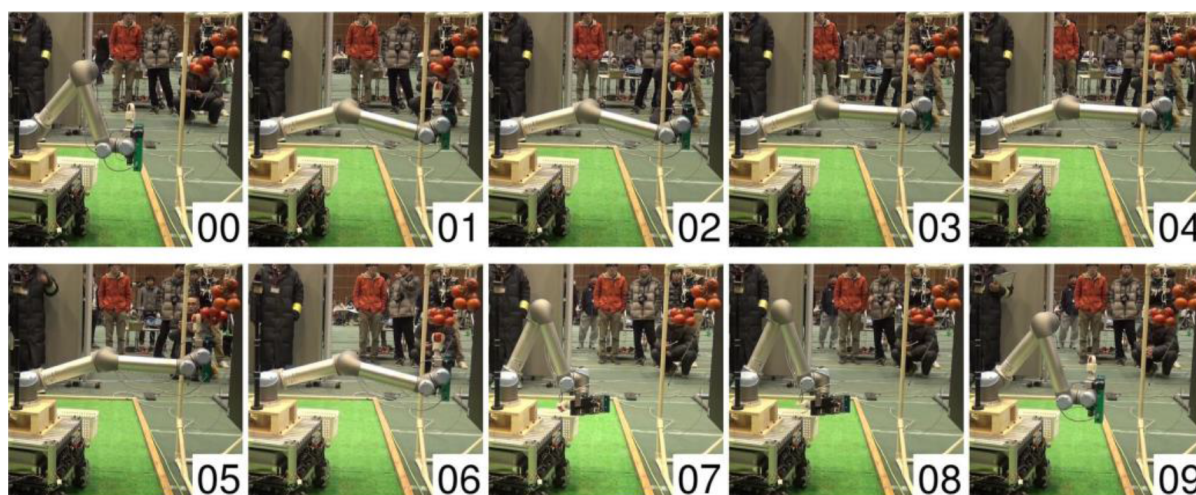


Figura 1.9. Fotografías de la competencia de "Robots de tomate" (Tomado de [10]).

Durante las pruebas al robot en una granja real se evaluó el desempeño con árboles de tomate en un entorno semi-abierto al medio ambiente para mostrar la efectividad y robustez bajo la luz solar directa.

Las pruebas hechas al robot en invernadero muestran que el tiempo de cosecha es menor en condiciones controladas. A continuación, se muestran imágenes de la cosecha en invernadero y una tabla de comparativa de tiempos entre el desempeño en la competencia de robot de tomate y el desempeño en un invernadero real.

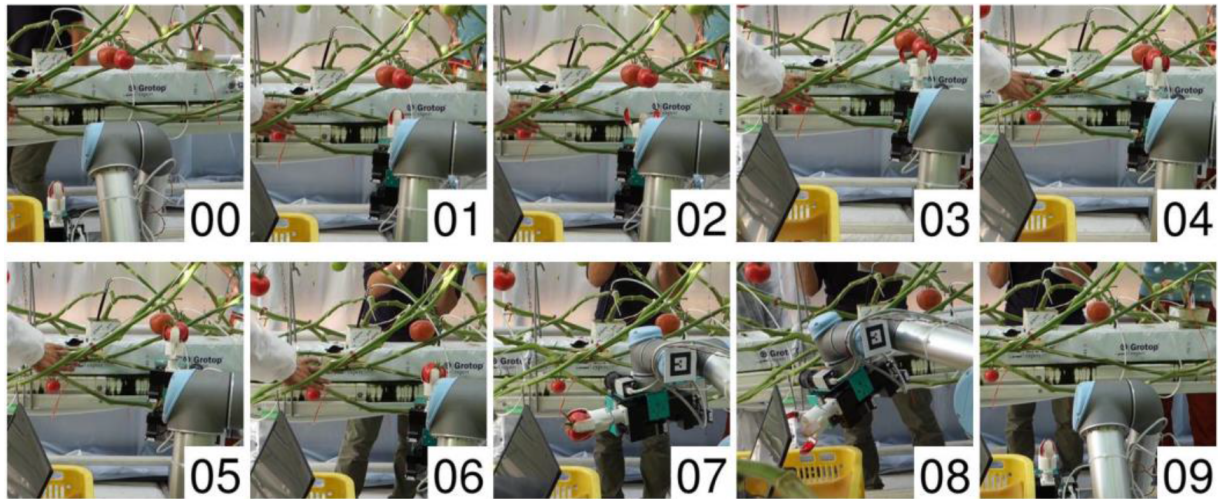


Figura 1.10. Fotografías de las pruebas realizadas al robot cosechador en un invernadero (Tomado de [10]).

A pesar de que el tiempo de la recolección de tomates en la competencia fue aproximadamente de 85 segundos (siendo la rotación del efector final la actividad que tomó más tiempo), en la prueba de invernadero este proceso de recolección de tomates fue reducido hasta 69 segundos, haciendo una diferencia significativa de tiempo en la rotación del efector final.

De este robot cosechador de tomates se pueden tomar los siguientes datos de interés.

- Montado en una base omnidireccional.
- Uso de brazo manipulador UR5
- El efector final es un sujetador rotativo.
- Sensores de presión en el actuador final.
- 60 % de éxito en la cosecha en invernaderos
- Tiempo estimado de recolección: 69 segundos por tomate.

Analizando los casos de fracaso de la cosecha, hay 3 tipos de fracaso: a) El tomate no queda atrapado entre los dedos del sujetador, b) El tomate se agarra con éxito, pero se desprende del cáliz, y c) El tomate no se cosecha porque la mano agarra múltiples frutas.

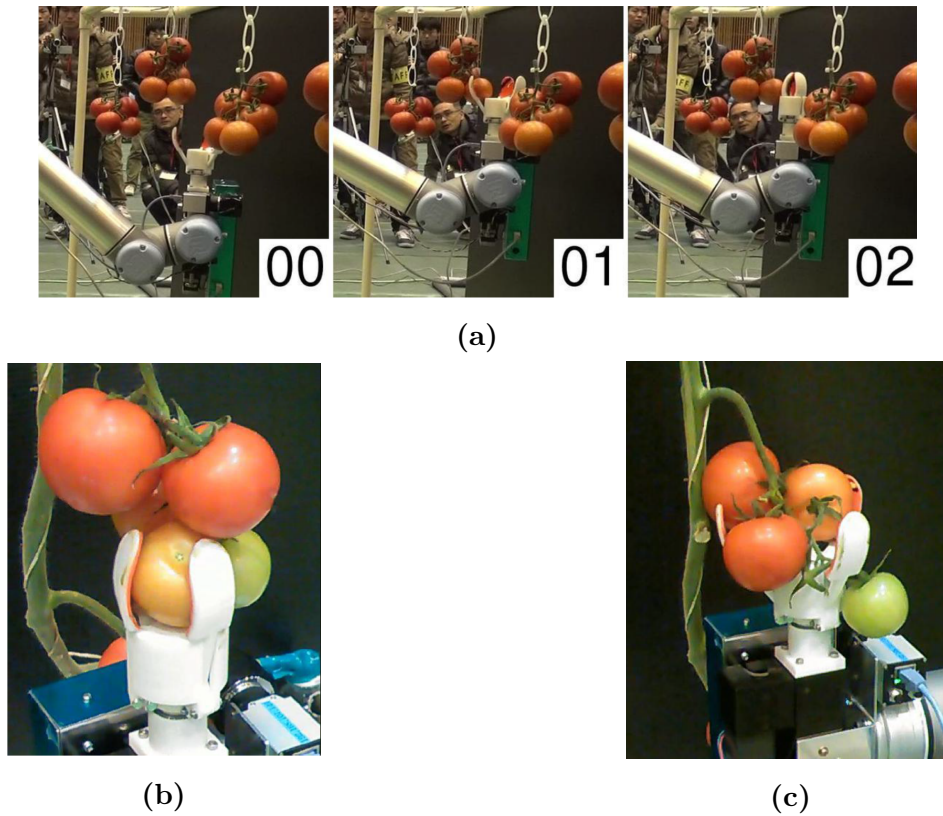


Figura 1.11. Casos de fallo en la recolección de tomates (Tomado de [10]).

1.3.3. Robot recolector de pimientos dulces

En el trabajo [11] se muestran los resultados del desarrollo de un robot para cosechar pimientos dulces en invernaderos. Se describe el ambiente de trabajo del robot y sus objetivos de diseño. La base del robot consta de dos módulos portadores. En el primero, se encuentran el manipulador, la electrónica de control y los ordenadores. En el segundo se colocan los sensores y la iluminación.

Los módulos acoplados pueden moverse entre las hileras de cultivo utilizando un sistema con rieles dentro de un invernadero en el sistema ferroviario dentro del invernadero. Las alturas de los módulos se pueden ajustar para que coincidan con la altura del cultivo. En el módulo portador del sensor se instalan dos cámaras de color de 5 megapíxeles y una cámara de tiempo de vuelo, las cuales generan imágenes de rango que proporcionan medidas de profundidad en tiempo real [12]. Las imágenes en color y los datos tridimensionales (3D) se calibraron y registraron.

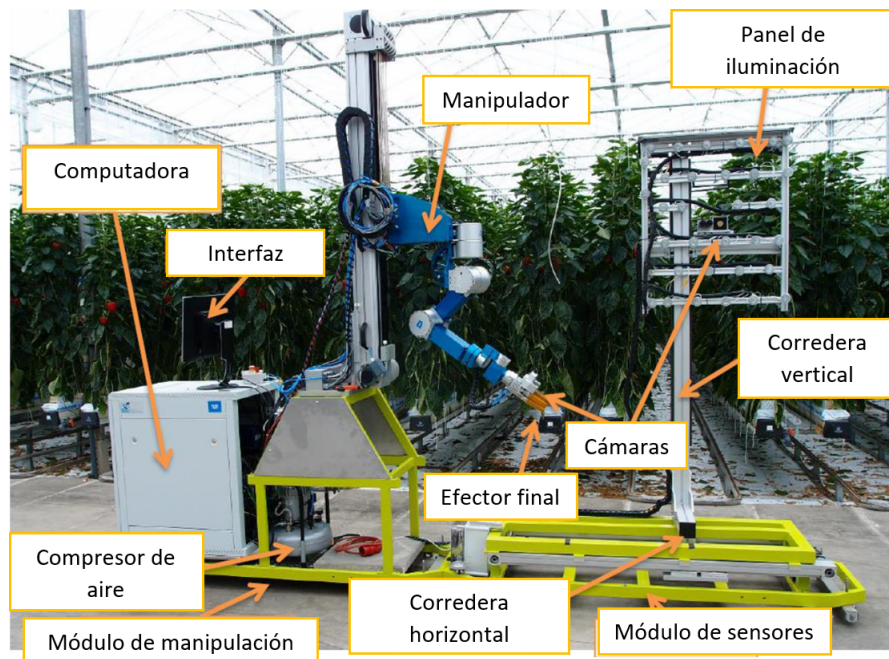


Figura 1.12. Módulos y componentes del robot recolector de pimientos dulces (Modificado de [11]).

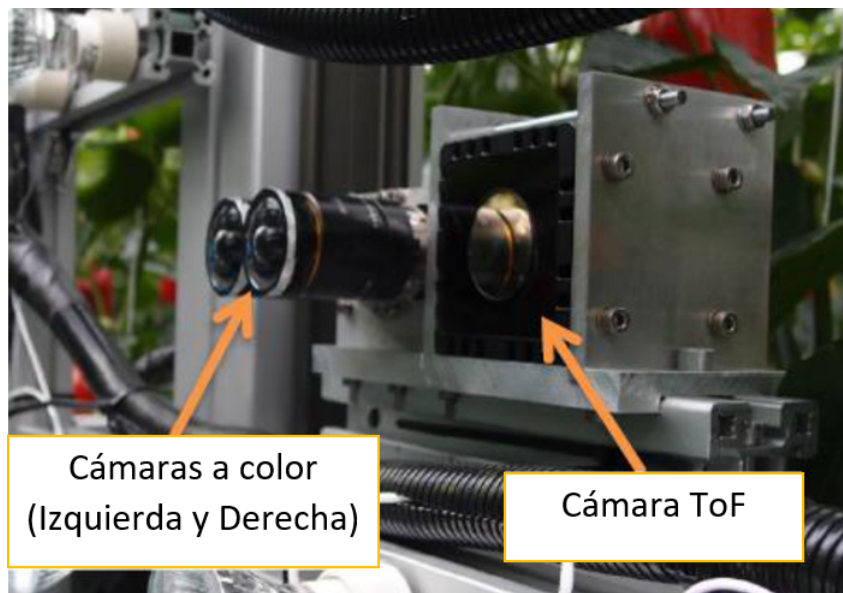


Figura 1.13. Cámaras usadas en el robot recolector de pimientos dulces (Modificado de [11]).

Alrededor de los sensores, una plataforma de iluminación se coloca para iluminar la escena. El sistema de sensores está montado en una corredera motorizada lineal y puede ser movido horizontalmente dentro y fuera del espacio de trabajo del manipulador.

El software de visión artificial localiza frutos maduros y obstáculos en 3D. Para la detección de frutas se han desarrollado diferentes enfoques. Una opción es iniciar la detección de la fruta por la detección simple del color rojo.



Figura 1.14. Detección de pimientos rojos por medio del sistema de visión
(Tomado de [11]).

Otra opción es realizar la localización de la fruta en dos pasos secuenciales. Se seleccionan las primeras regiones de interés en la imagen RGB que se sospecha que contienen frutos objetivo. A continuación, la localización de la fruta se realiza utilizando los datos 3D correspondientes, basados en la coincidencia de plantillas de nubes de puntos 3D.

Los algoritmos de detección de obstáculos se utilizan para localizar los tallos de la planta y los frutos no objetivo usando las pequeñas imágenes estereoscópicas de referencia. Con el fin de cosechar los frutos, un módulo de planificación de movimiento asegura una trayectoria libre de colisión para que el manipulador posicione el efector final en la posición de recolección.

Se diseñaron y se probaron dos tipos diferentes de efectores finales. La pinza Fin-Ray cuenta con un mecanismo combinado de agarre y corte. Este efector primero agarra la fruta y después corta el pedúnculo de la fruta.

El efector final de tipo labio, estabiliza primero la fruta usando una ventosa, después de lo cual dos anillos encierran la fruta y cortan el pedúnculo de la fruta.

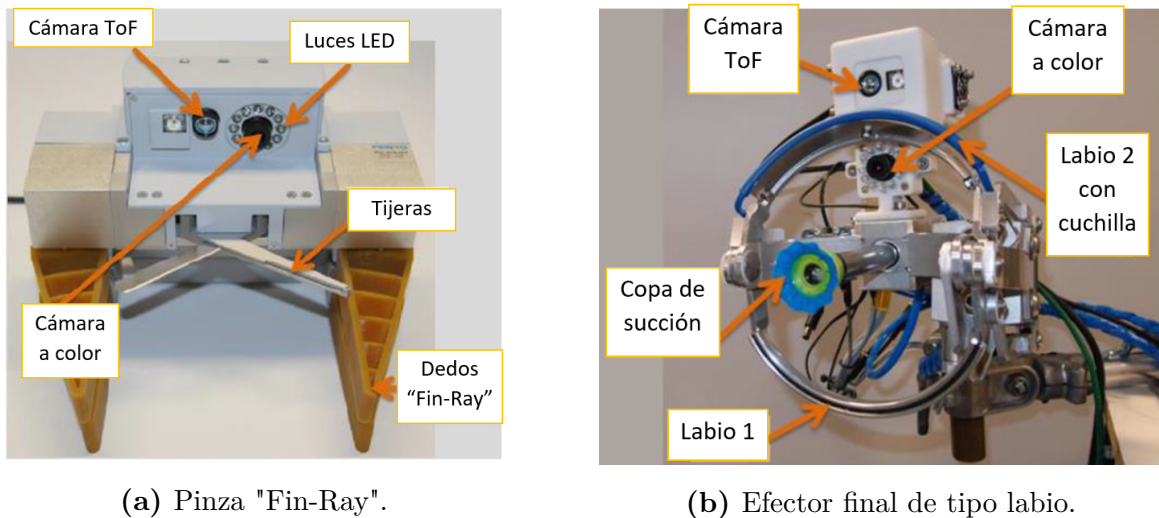


Figura 1.15. Herramientas diseñadas para la recolección de pimientos dulces (Modificado de [11]).

Ambos efectores finales tienen una cámara miniatura RGB y una cámara de Tiempo de Vuelo (ToF por sus siglas en inglés) para refinar la posición de la fruta y determinar la posición de la fruta.

La plataforma de software principal del robot fue implementada para el sistema operativo Linux y utiliza el middleware de código abierto Robot Operating System (ROS). La estructura de control de coordinación se basa en una máquina de estado finito e incluye herramientas de diagnóstico y medidas de rendimiento [8].

Los datos de interés de este robot son:

- Dividido en dos módulos.
- Uso de dos cámaras a color de 5 megapíxeles y una cámara de tiempo de vuelo ubicadas en el tablero de iluminación y una cámara a color y una cámara de tiempo de vuelo en el efector final.
- Diversos tipos de efectores finales para el robot.
- Tiempo de recolección: 70 segundos por pimiento dulce.
- 72 % de éxito en el proceso de cosecha.

Se puede afirmar que una de las herramientas más comunes para atacar el problema de la cosecha de hortalizas es la visión por computadora, esto debido a que es necesario obtener cualidades únicas de color, forma o tamaño de las hortalizas.

Para este trabajo de tesis se plantea el uso de la metodología de manipulación en espacio de cámara. Debido a que hasta el momento no se ha desarrollado un sistema de visión en configuración cámara en mano bajo esta metodología, se planea extender este concepto de control por visión.

1.4. Manipulación en espacio de cámara (CSM)

El método de manipulación en espacio de cámara es una técnica que vienen implementándose desde el año 1987, año donde vio la luz el modelo de dos dimensiones mostrado en [13]. En este artículo se muestran los resultados de un experimento en el cual un brazo mecánico de un grado de libertad realiza la tarea de atrapar una pelota de ping-pong en un ambiente de dos dimensiones.

Posteriormente el modelo tridimensional fue desarrollado en 1990 [14] y para 1992 la metodología de CSM se implementa en un sistema no-holonómico [15].

Desde la aparición de esta metodología de control por visión se han realizado variantes de esta metodología (Como las que se indican en [16], [17]). El método OFL-CSM (“Orthographic + Flattening Camera Space Manipulation”), expresado en [18], que consiste en el uso del modelo ortográfico de cámara y un ajuste conocido como "flattening" que considera el efecto de perspectiva, y el método utilizando un modelo de cámara lineal LCM-CSM (“Camera-Space Manipulation using a Linear Camera Model”) el cual se define en [19] y hace uso del modelo de perspectiva. Algunos de los proyectos más recientes realizados bajo esta metodología se explican a continuación.

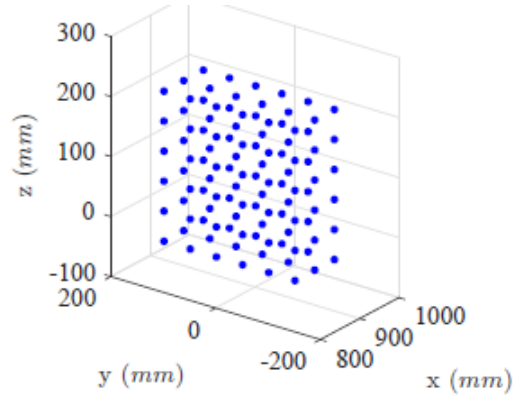


Figura 1.17. Puntos muestra que definen el espacio de estimación paramétrica (Tomado de [20]).

Estas muestras son generadas con un led montado en el efector final del robot manipulador para asegurar que están dentro del espacio de trabajo del robot.

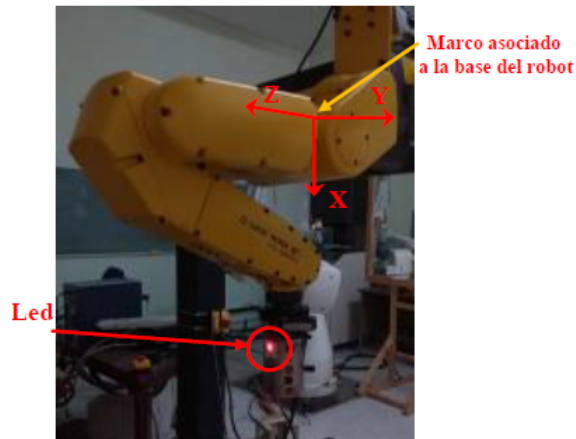


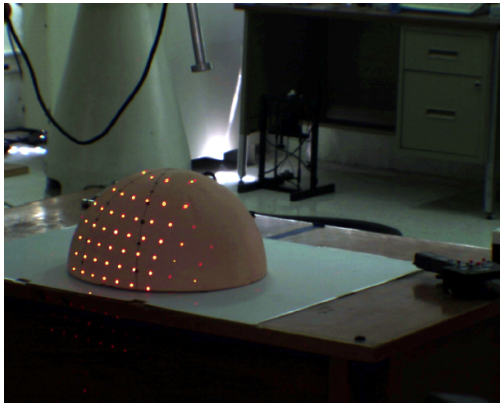
Figura 1.18. Led montado en el efector final del robot Fanuc LR Mate 200iC (Tomado de [20]).

El error promedio existente entre los puntos muestra estimados contra los medidos se puede apreciar en la Tabla 1.1:

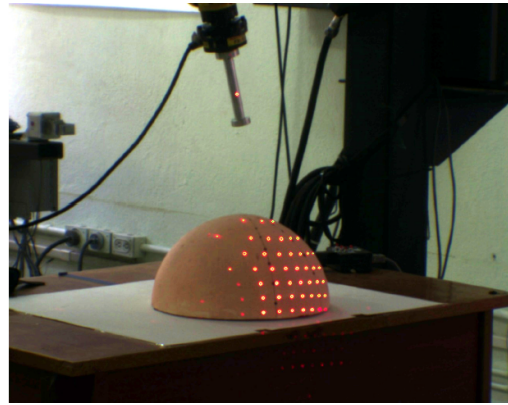
Error medio			
Eje X	Eje Y	Eje Z	Magnitud
1.4 mm	1.4 mm	1.4 mm	2.3 mm

Tabla 1.1. Error medio en la estimación paramétrica.

Para identificar una superficie dentro del espacio de trabajo del robot, se proyectan puntos con láser y por medio de la posición 3D de estos puntos se estima la localización de dicha superficie.



(a) Cámara 1.



(b) Cámara 2.

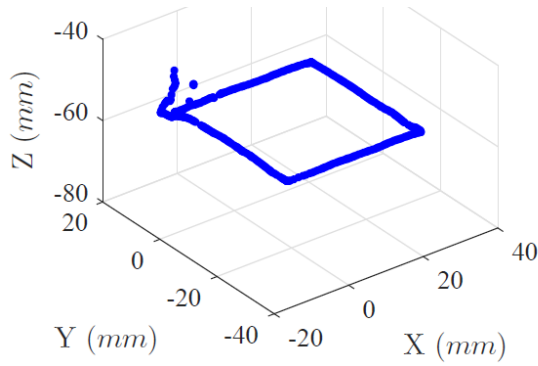
Figura 1.19. Proyección de puntos generados por láser en la superficie (Tomado de [20]).

Una vez que el sistema de visión estima una superficie dentro el espacio de trabajo del robot esclavo, se realiza una correlación entre dicha superficie y el plano de trabajo de la unidad háptica. Así la unidad háptica se mantiene dentro de un plano mientras que el robot esclavo se mueve sobre la superficie estimada.

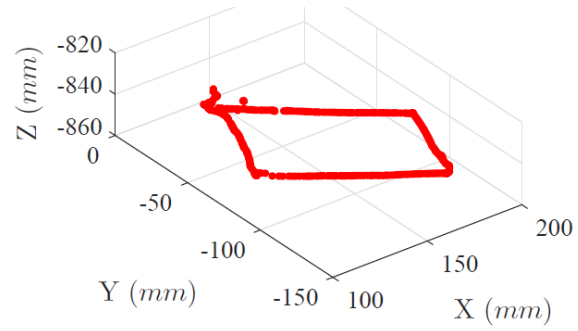
Las superficies que se someten al reconocimiento por el sistema de visión son:

- Superficie plana.
- Superficie de sección esférica.
- Superficie arbitraria

En las Figuras 1.20, 1.21, 1.22, se observan las trayectorias realizadas por la unidad háptica (maestro) y el robot industrial (esclavo) en cada tipo de superficies propuestas.

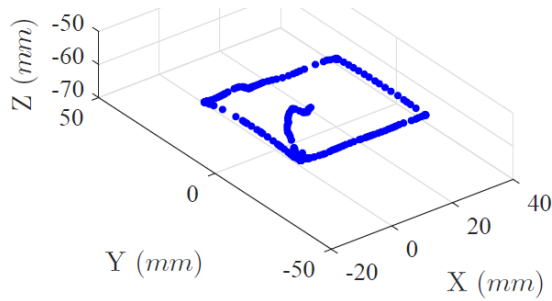


(a) Trayectoria maestro.

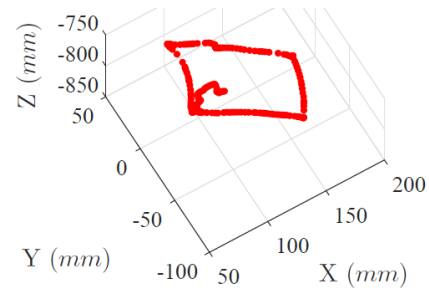


(b) Trayectoria esclavo.

Figura 1.20. Trayectorias descritas por el dispositivo maestro y esclavo sobre una superficie plana (Tomado de [20]).

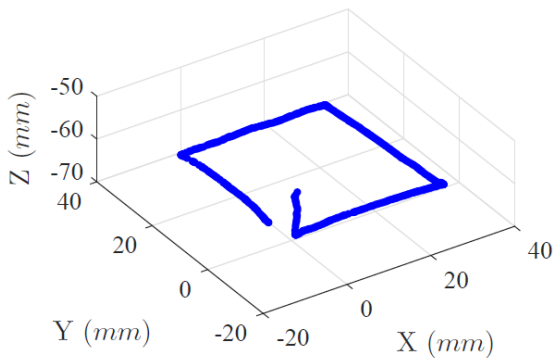


(a) Trayectoria maestro.

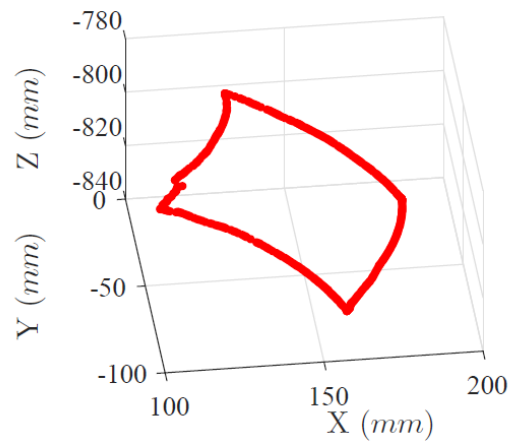


(b) Trayectoria esclavo.

Figura 1.21. Trayectorias descritas por el dispositivo maestro y esclavo sobre una superficie esférica (Tomado de [20]).



(a) Trayectoria maestro.



(b) Trayectoria esclavo.

Figura 1.22. Trayectorias descritas por el dispositivo maestro y esclavo sobre una superficie arbitraria (Tomado de [20]).

1.4.2. Control en velocidad, basado en visión, de un robot paralelo tipo Delta

En el trabajo que se presenta en [21] se desarrolla e implementa una técnica de control basado en visión aplicada a un robot paralelo tipo Delta.

Esta técnica está inspirada en la metodología LCM–CSM, la cual es una metodología de control por visión de robots que recientemente se ha demostrado que puede controlar robots paralelos.

El control en velocidad le permite hacer posicionamientos con desplazamientos suaves y rápidos, así como realizar seguimiento de trayectorias (esta capacidad permite, entre otras, realizar manipulación de objetos en movimiento). La Figura 1.23 muestra de manera esquemática esta metodología.

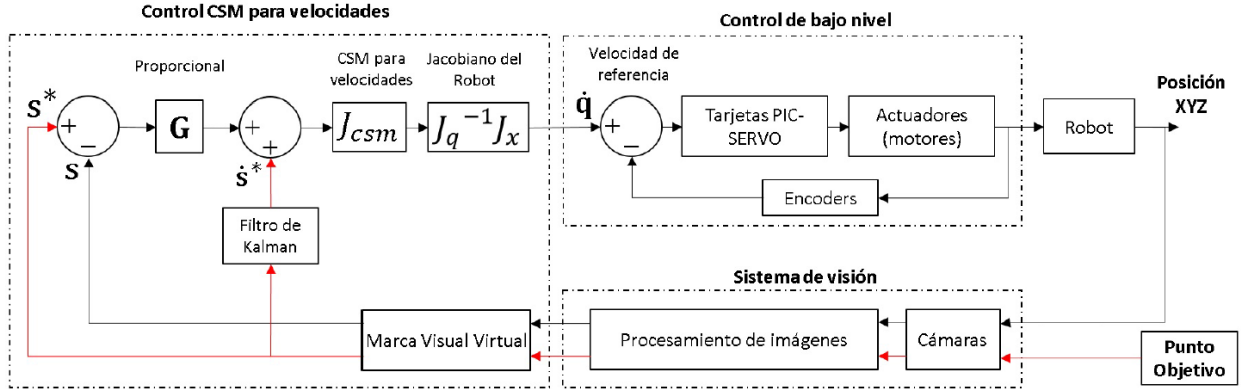


Figura 1.23. Esquema de control CSM en velocidades (Tomado de [21]).

En este caso, para realizar la estimación de parámetros de visión se utilizan 410 puntos distribuidos en todo el espacio de trabajo del robot Delta Parallax LKF-2040. En la Figura 1.24 los asteriscos azules muestran las posiciones del efector final en coordenadas 3D respecto al marco de referencia del robot.

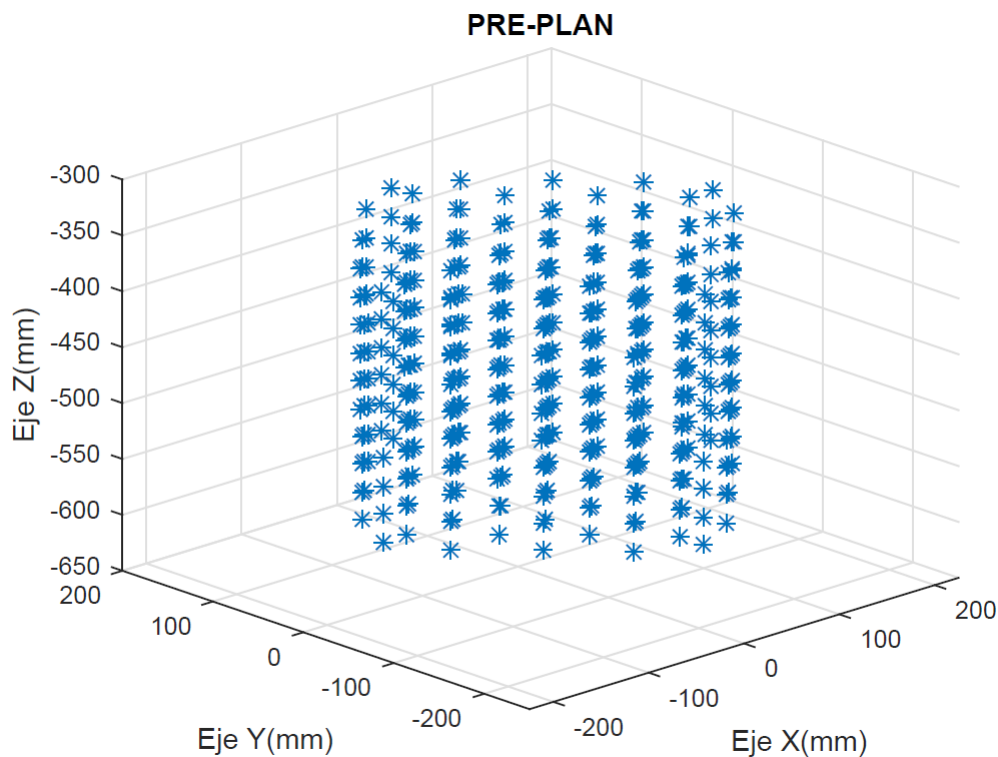


Figura 1.24. Vista isométrica de la distribución de los puntos usados a lo largo de una trayectoria planeada [21].

Los puntos son generados por un led montado en el efector final del robot.

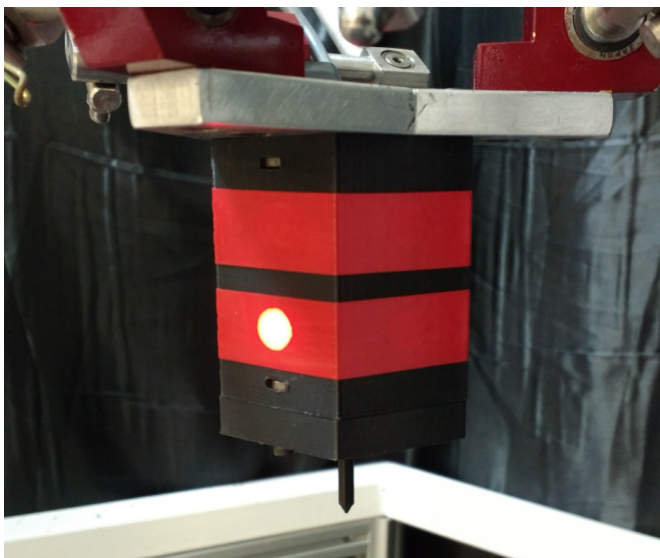
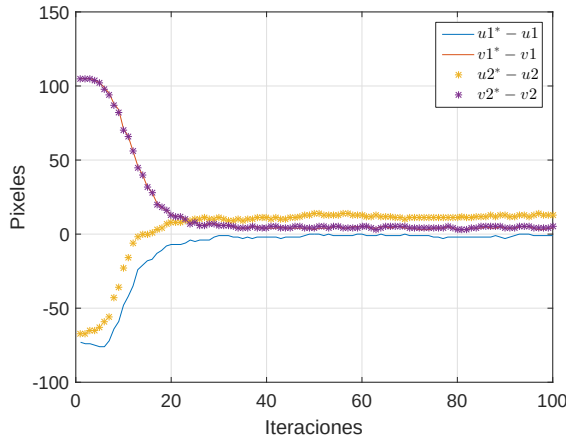
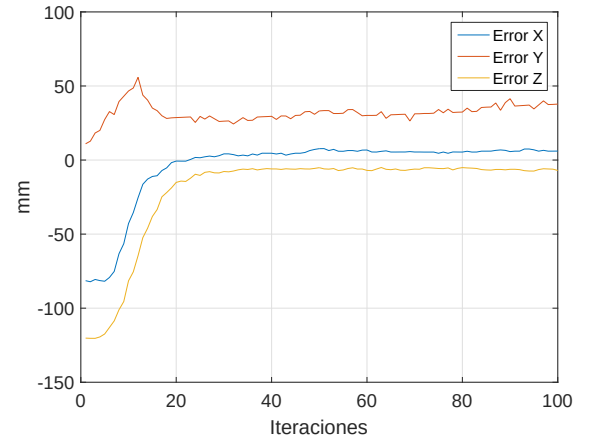


Figura 1.25. Led montado en el efector final del robot Delta Parallax LKF-2040 [21].

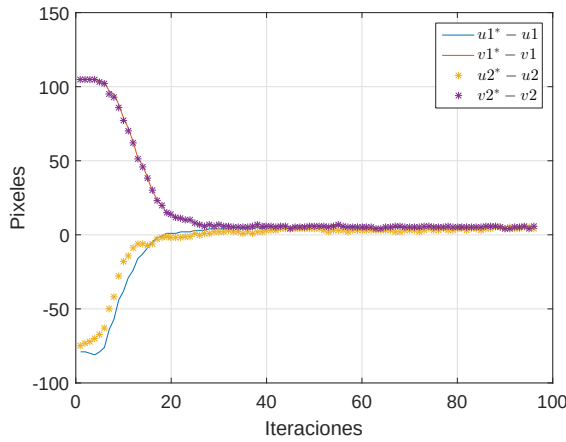
Para la tarea de posicionamiento del robot delta se utilizan objetivos en movimiento (sobre una banda transportadora). En la Figura 1.26 se puede observar que el uso de la ley de control por si misma presenta un error considerable en el seguimiento de un objetivo, pero al momento de aplicar filtro de Kalman y recalcular los parámetros de visión se reduce el error en el seguimiento del objeto.



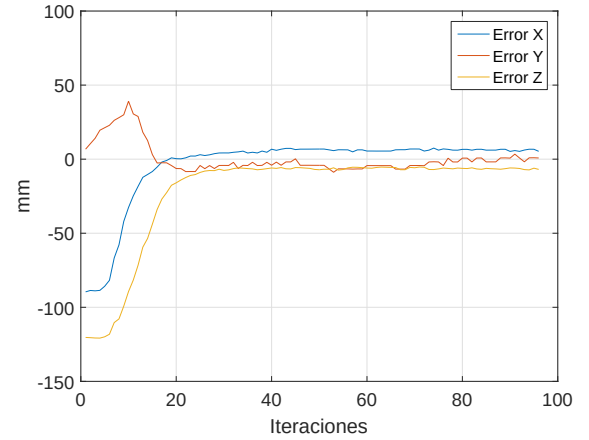
(a) Error en píxeles sin compensación de velocidad.



(b) Error tridimensional sin compensación de velocidad.



(c) Error en píxeles usando filtro de Kalman.



(d) Error tridimensional usando filtro de Kalman.

Figura 1.26. Error en la posición del efector final respecto a un punto objetivo con una velocidad de banda de 7 cm/s (tomado de [21]).

La prueba mostrada con anterioridad se realiza con una velocidad de banda de 7 cm/s. Los resultados para velocidades de banda mayores también están incluidas en el documento.

1.5. Conclusiones del capítulo 1

Con base en la revisión bibliográfica se concluye que hay diversos sistemas de visión para la recolección de hortalizas, sin embargo, no hay sistemas de este tipo desarrollados bajo la metodología de manipulación en espacio de cámara. Esto significa un campo de trabajo totalmente nuevo donde esta metodología puede ser aplicada.

Es importante considerar que para automatizar un invernadero el entorno debe ser automatizable, debido a que aún pueden presentarse limitaciones en la detección de objetivos y en la ubicación del robot manipulador que pueden reducir en gran medida el porcentaje de éxito en la cosecha.

Los sistemas de cosecha presentan generalmente algoritmos de tratamiento de imágenes que consisten en segmentación por medio de color y forma. Estos algoritmos son muy eficientes bajos las condiciones de que el entorno esté limpio y se le dé un manejo previo a las hortalizas antes de las fechas de cosecha.

Como se expresó anteriormente, la metodología de manipulación de espacio de cámara se ha utilizado para el desarrollo de múltiples sistemas de visión, pero todos estos los sistemas de visión presentan el uso de cámara fijas respecto a un sistema coordinado usualmente unido a la base del robot. Esto representa un gran problema puesto que no es conveniente usar cámaras fijas si el objetivo, en este caso un tomate, puede estar oculto dentro del espacio de cámara.

Para esta tarea de recolección de hortalizas es necesario el desarrollo de una metodología basada en CSM que permita el desarrollo de sistemas de visión en configuración cámara en mano.

Sistema de detección de tomates basado en visión por computadora

Diversos sistemas de visión aplicados a la agricultura se han desarrollado actualmente, la gran mayoría de estos se basan en el uso de algoritmos de tratamiento de imágenes. Comúnmente muchos de los algoritmos aplicados a la detección de hortalizas solamente se basan en procesos de segmentación de imagen y el uso de operaciones morfológicas para la reducción de ruido en la imagen segmentada (Algunos ejemplos de algoritmos son [22, 23]). Estos procesos no son suficiente para detectar múltiples objetos cercanos y solamente se limitan a usarse en entornos con pocos objetivos a detectar.

En algunos trabajos se plantea la opción de separar hortalizas en la imagen de manera manual, tal es el caso de [24] donde se hace una edición de imagen binaria y posteriormente se detectan los contornos de los objetivos (Figura 2.1), pero esto no resuelve el problema de poder realizar una separación de contornos sin intervención humana en el proceso.

En el presente trabajo se plantea un algoritmo capaz de detectar tomates rojos en un entorno semi-automatizado y además que pueda detectar objetivos muy cercanos en la mayoría de los casos que se puedan presentar.

Cabe destacar que diversos trabajos que hacen uso de algoritmos de tratamiento de imágenes se realizan utilizando las librerías de OpenCV junto a un entorno de programación especializado (Preferentemente Python y Visual Studio).

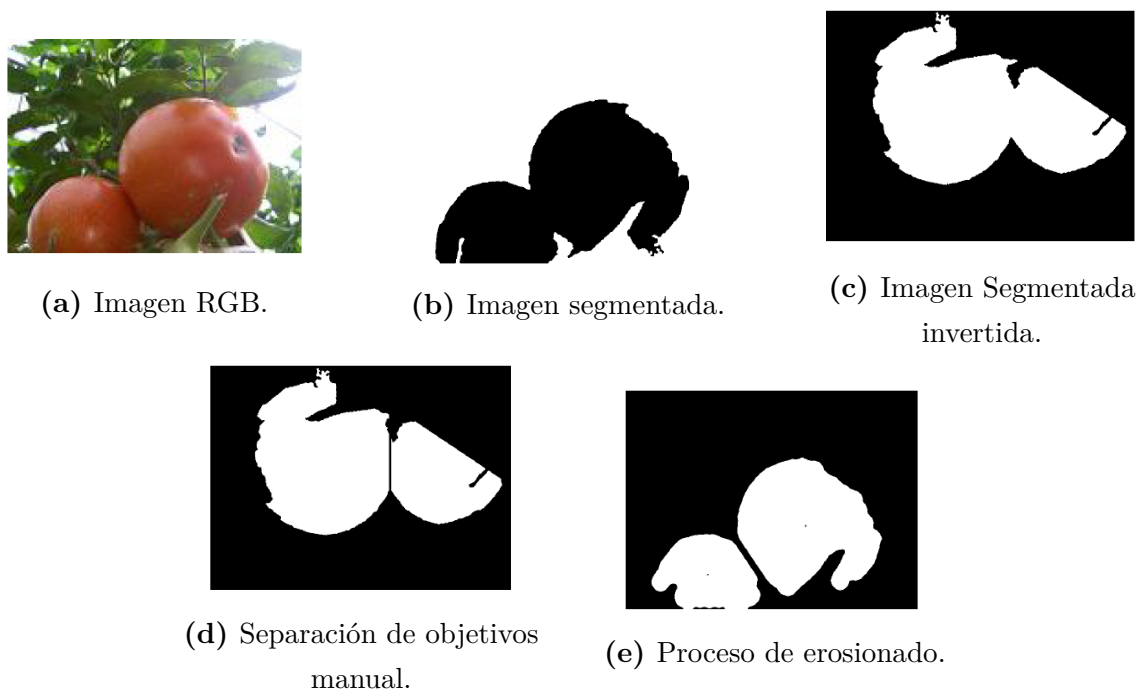


Figura 2.1. Proceso de separación de objetivos (Modificado de [24])

Para el presente trabajo se hace uso del entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) Microsoft Visual Studio y de la librería OpenCV. OpenCV es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel. Desde que apareció su primera versión alfa en el mes de enero de 1999, se ha utilizado en infinidad de aplicaciones, desde sistemas de seguridad con detección de movimiento, hasta aplicaciones de control de procesos donde se requiere reconocimiento de objetos.

La librería está escrita en los lenguajes C y C++ y es compatible con Linux, Windows y Mac OS X. Cuenta con un desarrollo activo en interfaces para Python, Ruby, Matlab y otros lenguajes. También ha sido diseñada para ser eficiente en cuanto a gasto de recursos computacionales y con un enfoque hacia las aplicaciones de tiempo real.

OpenCV está escrita y optimizada en C y puede tomar ventaja de los procesadores con múltiples núcleos. La librería contiene aproximadamente 500 funciones que abarcan muchas áreas de CV, incluyendo inspección de productos de fábricas, escaneo médico, seguridad, interfaces de usuario, calibración de cámaras, robótica, etc. [25].

2.1. Coloración del tomate al momento de la cosecha

La detección y segmentación de objetos es la tarea fundamental más importante y desafiante de la visión por computadora. Es una parte crítica en muchas aplicaciones, como búsqueda de imágenes, comprensión de escenas, etc. Sin embargo, sigue siendo un problema abierto debido a la variedad y complejidad de las clases de objetos y fondos.

La forma más fácil de detectar y segmentar un objeto desde una imagen son los métodos basados en el color. El objeto y el fondo deben tener una diferencia de color significativa para segmentar con éxito objetos utilizando métodos basados en esta característica.

En este trabajo se planea la detección de tomates rojos con un grado de maduración rojo firme debido a que la especie de tomate a cosechar esta destinada a agroindustria. La escala de madurez para tomate involucra seis estados de maduración, los cuales se incluyen en la Tabla 2.1. También se indica la equivalencia de nomenclatura, manejada por productores e intermediarios en el mercado nacional [26].

Grado de Madurez	Nomenclatura		Características
	Nacional	Internacional	
1	Verde (Madurez fisiológica)	Mature-Green	Superficie del tomate 100 % color verde, con cambio de tono.
2	Verde avanzado	Breaker	Hay cambio de color hasta un máximo de 10 % (puede ser rosado o amarillo).
3	Torneado	Turning	Desarrollo de color amarillo, rosado o rojo superior al 10 % pero menor al 30 %.
4	Rosado	Pink	Desarrollo de color amarillo, rosado o rojo superior al 30 % pero menor al 60 %.
5	Rojo ligero	Light red	Desarrollo de color rosado o rojo superior al 60 % pero menor al 90 %.
6	Rojo firme	Red	Desarrollo de color rojo en más del 90 %, pero firme.

Tabla 2.1. Valores de Matiz de colores básicos (Tomado de [27]).

La figura 2.2 muestra la coloración del tomate a lo largo de su proceso de maduración. De este grado de maduración depende el mercado en el que se quiere comercializar el fruto.

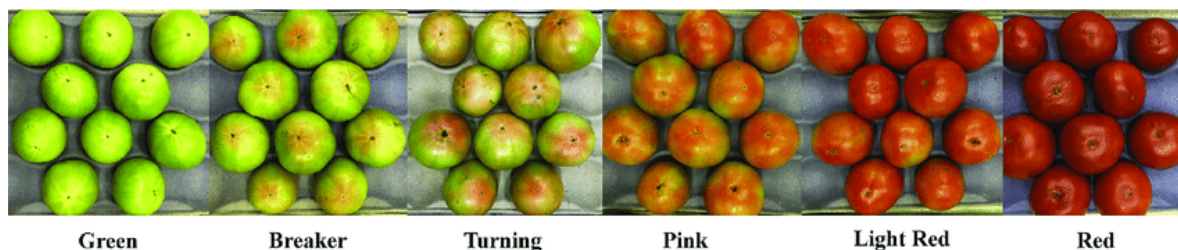


Figura 2.2. Proceso de maduración de los tomates (Tomado de [28]).

Si el tomate es para comercializar en mercados de exportación, debe cortarse aun cuando está de color verde (grado 1). Este es el tomate llamado "verde maduro" en el mercado internacional. El tomate que se destina a agroindustria se cosecha totalmente maduro para que de esta forma se desarrollen adecuadamente cualidades que cumplen con parámetros de calidad en color, sabor, textura, acidez y sólidos totales. Los tomates que se van a comercializar como producto fresco en el mercado nacional lo mejor es cosecharlo en grado 2, porque este es un tomate con buena firmeza y podrá soportar el manejo, desde la cosecha hasta que llegue al consumidor, mejor que un fruto maduro o muy maduro.

Como se menciona en [27], cuando el tomate se va a cosechar, se toma el fruto con la mano y se aplica una ligera torsión, y a la vez se jala. Cuando el fruto es inmaduro, es recomendable sostener el pedúnculo para no jalarlo cuando se aplica la torsión y así no ocasionar daños a la planta. La firmeza del cultivo disminuye una vez que el tomate muestra en su superficie el color rosado. Se evidencia por lo tanto, que el fruto debe manejarse cuidadosamente aunque no esté totalmente maduro. Una vez cosechado el tomate se debe colocar con cuidado en las cajas del campo.

2.2. Uso de filtros para detección de colores

OpenCV, por lo general, captura imágenes y videos en 8 bits, formato RGB. En otras palabras, las imágenes capturadas pueden considerarse como 3 matrices; rojo, verde y azul (de ahí el nombre RGB) con valores enteros que van de 0 a 255.

La Figura 2.3 muestra cómo se representa una imagen en color usando 3 matrices, donde cada cuadro pequeño representa un pixel de la imagen. En imágenes reales, estos pixeles son

tan pequeños que el ojo humano no puede diferenciarlos.

Por lo general, uno puede pensar que el espacio de color RGB es más adecuado para la segmentación basada en el color. Pero el espacio de color HSV es el espacio de color más adecuado para la segmentación de imágenes basadas en color ya que con un solo parámetro se pueden segmentar los colores en una imagen, a diferencia del espacio RGB. El espacio de color HSV también consta de 3 matrices, Matiz (Hue), Saturación (Saturation) y Valor (Value). En OpenCV, el rango de valores para Matiz, Saturación y Valor son respectivamente 0-179, 0-255 y 0-255. Matiz representa el color, Saturación representa la densidad de dicho color y Valor representa que tan oscuro es el color seleccionado.

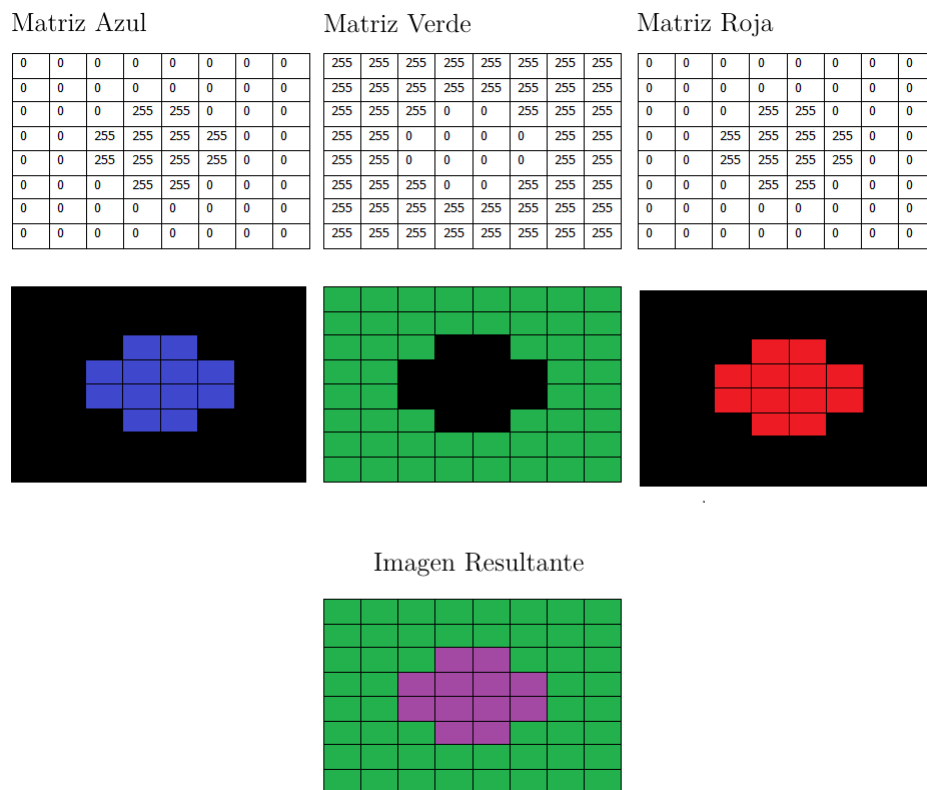


Figura 2.3. Conformación de una imagen RGB (Modificado de [29]).

La figura 2.4 muestra una representación gráfica de los valores de Matiz, Saturación y Valor en forma de cono. Esto con el fin de ejemplificar mejor el uso de este espacio de colores.

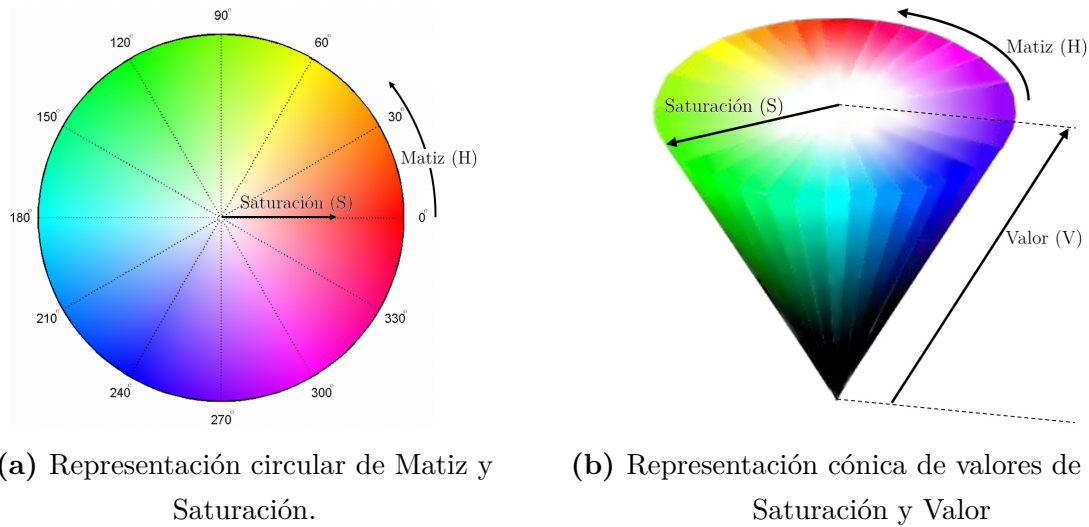


Figura 2.4. Representación gráfica de los valores H, S y V que conforman una imagen a color (Modificado de [30]).

En la Tabla 2.2 se muestran los valores de Matiz de colores básicos, estos sirven como base para filtrar los colores diferentes de rojo o naranja de la imagen.

Color	Rango de valores de Matiz
Naranja	0-22
Amarillo	22-38
Verde	38-75
Azul	75-130
Violeta	130-160
Rojo	160-179

Tabla 2.2. Valores de Matiz de colores básicos.

Los rangos de valores para Saturación y Valor se deben seleccionar según las condiciones de iluminación del entorno y superficie del objeto. Los rangos que se seleccionaron para esta primera identificación de colores se muestran en la Tabla 2.3:

Parámetro	Rango
Matiz	0-25
Saturación	188-255
Valor	80-255

Tabla 2.3. Rango de valores de Matiz, Saturación y Valor.

Después de realizar la selección de los rangos de Matiz, Saturación y Valor, se procede a la obtención de una imagen binaria que defina los límites de los objetos de interés. A este proceso se le conoce como segmentación de imágenes el cual filtra los valores de Matiz, Saturación y Valor que no se encuentren dentro de los rangos establecidos y en una imagen nueva les da un valor de 0, aquellos pixeles que sus valores H, S y V están dentro de los rangos en la imagen nueva toman un valor de 1. A continuación se muestra el proceso de binarización de una imagen con círculos rojos.

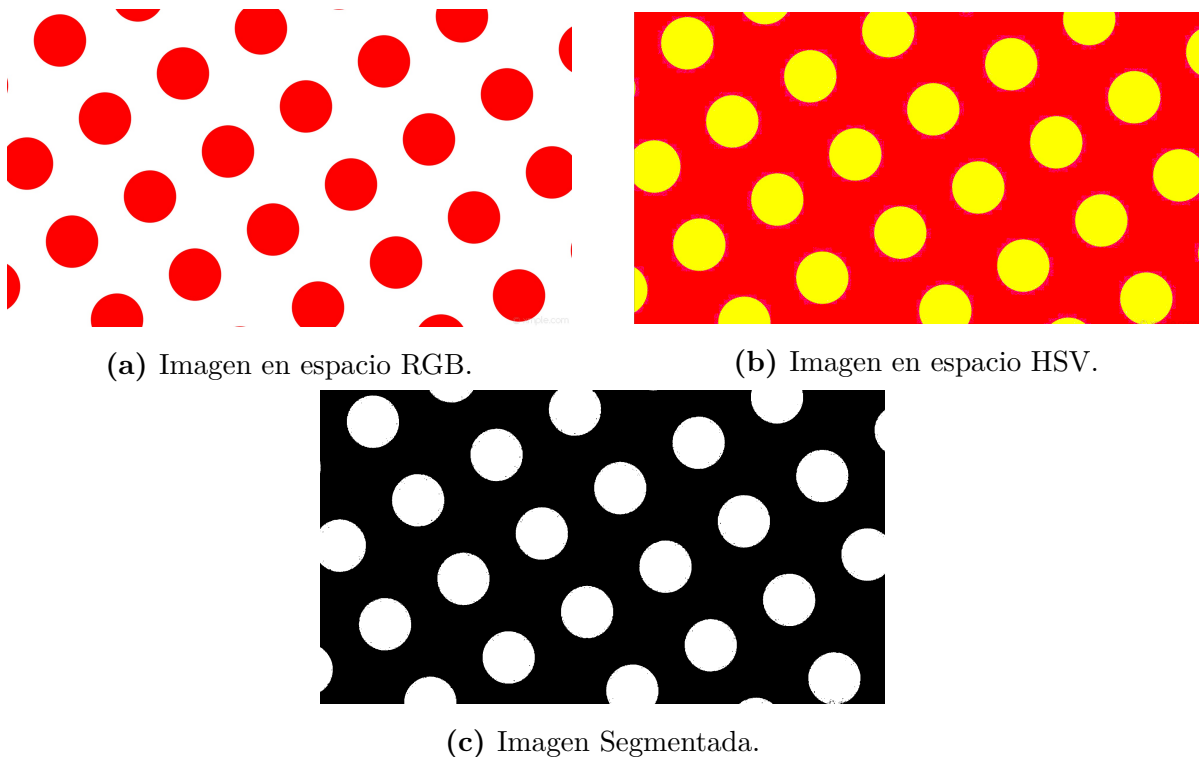


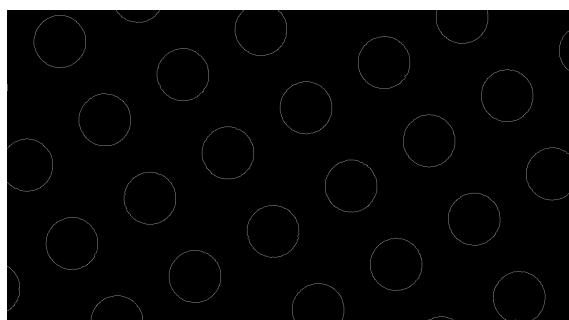
Figura 2.5. Proceso de transformación de imagen de RGB a binaria.

Como se muestra en la Figura 2.5c el resultado de filtrar el color rojo de la imagen de prueba da como resultado una imagen binaria, con la que se puede trabajar para la obtención de múltiples contornos en la imagen.

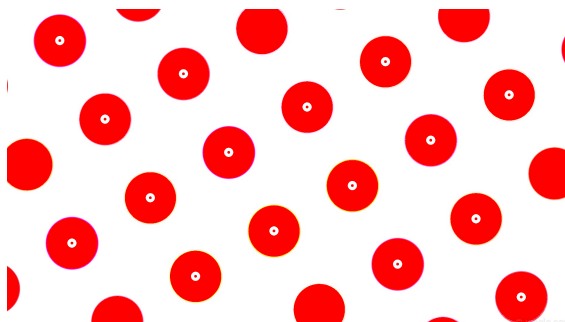
2.3. Obtención de centros geométricos de múltiples objetos en la imagen

Para la obtención del centro geométrico de objetos vistos por las cámaras es necesario obtener el contorno de dicho objeto. El contorno se puede obtener fácilmente de la imagen binarizada, ya que esta trabaja con un canal a un bit y se requiere procesar menos información que en una imagen RGB (tres canales a 8 bits). Para obtener los contornos de la imagen binaria es necesario aplicar un algoritmo de Canny [31] con el fin de dejar en la imagen las zonas que cambian de blanco a negro drásticamente.

Después de tener la imagen de contornos se hace uso de la herramienta FindContours de OpenCV [32]. Esta herramienta permite extraer los contornos en forma de vector y realiza un post-procesamiento para la obtención de los momentos del área dentro de cada contorno.



(a) Contornos de los círculos blancos de la imagen binaria.



(b)

Figura 2.6. Resultado del uso de filtro "Canny" y del algoritmo de detección de centroides.

De esta manera se pueden obtener los centros geométricos de cada área. Los centros geométricos calculados son aquellos que no tienen contacto con las orillas de la imagen ya que no se tiene más información para poder cerrar el contorno. El resultado del cálculo de los centroides de la imagen de prueba se muestra en la Figura 2.6b.

2.4. Operaciones morfológicas

En la Figura 2.5c se puede apreciar una imagen binarizada en la cual los círculos blancos representan los píxeles que están dentro de los rangos de Matiz, Saturación y Valor que se están buscando. Sin embargo, en el caso de una fotografía tomada a un tomate, existe mucho ruido y la tarea de encontrar los contornos de objetos a manipular se vuelve complicada.

Se toma una imagen de prueba en un huerto de tomates y se binariza para detectar problemas en la detección de la posición de los tomates en la imagen.

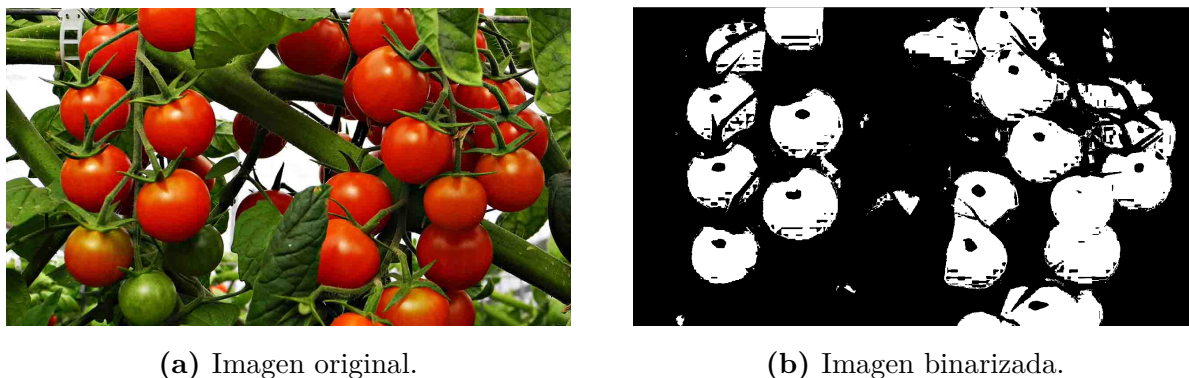


Figura 2.7. Binarización de una imagen en un entorno real.

En la imagen de la Figura 2.7b se puede observar que existe mucho ruido en la imagen e incluso zonas donde se refleja una mayor cantidad de luz en los tomates. Existen diversos procesos dentro del tratamiento de imágenes para eliminar estos problemas. El proceso más común para reducir el ruido en una imagen es el uso de operaciones morfológicas [33].

2.4.1. Apertura y cerradura morfológica

La apertura morfológica consiste en erosionar las áreas blancas de la imagen binarizada para después volverlas a dilatar, esto con el fin de eliminar píxeles blancos del fondo negro de la imagen sin alterar el tamaño de las áreas blancas. La cerradura morfológica resulta al dilatar las áreas blancas de la imagen binaria y posteriormente erosionar, así se eliminan píxeles blancos dentro de las áreas blancas.

2.4.2. Aplicación de operaciones morfológicas

Ambas operaciones son aplicadas a la imagen de la Figura 2.7b dando como resultado una imagen con bordes más suavizados que se observa en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Imagen de prueba binarizada.

Esta imagen muestra claramente la reducción del ruido en el fondo y una menor existencia de ruido dentro de los contornos de los tomates. Sin embargo, aún existen zonas no detectadas dentro de los contornos de los tomates.

2.5. Algoritmo para reducción de ruido por el exceso de luz en la imagen binaria

Si se realiza el procedimiento de filtrado de contornos de la imagen binaria con un filtro de Canny (posterior a la aplicación de operaciones de apertura y cerradura), se obtienen los contornos y por consecuencia los centros geométricos de los tomates, pero debido a que la imagen aun presenta ruido, se puede observar (figura 2.9) que la detección de tomates sigue presentando problemas.

El error en el algoritmo de detección de tomates es producto del ruido que se presenta en la imagen binaria. Este ruido es asociado principalmente al exceso de luz que reflejan los tomates en su corteza.

Este exceso de luz es un problema importante para el tratamiento de imágenes, debido a que estas zonas con mayor intensidad de luz deben estar dentro de los rangos de valores H, S y V. Sin embargo, salen del rango establecido, por lo que en la imagen binarizada estas áreas de luz se presentan como áreas negras dentro del área total que ocupa el tomate, como se ve en la figura 2.8.



Figura 2.9. Detección de tomates en imagen prueba.

Para eliminar los contornos producidos por el exceso de luz es necesario identificar el área que encierran estos contornos. Esta área se identifica fácilmente con la función `floodFill` de la librería de OpenCV [34].

La función `floodFill` asigna valores de 1 a todos los píxeles de la imagen que estén fuera de los contornos de los tomates comenzando desde el píxel (0,0) que se encuentra en la esquina superior izquierda de la imagen. Con este procedimiento se obtiene una imagen donde los píxeles fuera de los rangos de Matiz, Saturación y Valor propuestos y que además están dentro del contorno de los tomates, se mantienen con un valor 0 en la imagen binaria.

La matriz resultante del proceso de llenado se invierte para obtener las zonas con exceso o déficit de iluminación que están dentro de los contornos de los tomates. La imagen invertida se ilustra en la Figura 2.10b.

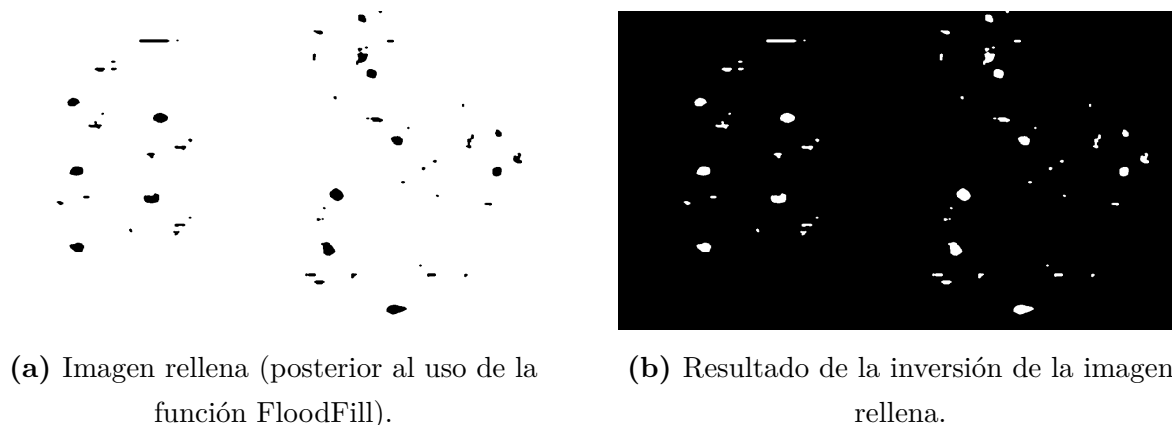


Figura 2.10. Proceso de detección de zonas con altos niveles de luz en la superficie de los tomates.

Se realiza una operación booleana "or" con la imagen invertida y la imagen binarizada y así, el área con exceso de luz es agregada a la imagen binarizada y se evitan los contornos extra en las zonas con una iluminación fuera de los rangos propuestos de valores H, S y V.



Figura 2.11. Imagen invertida sumada a la imagen binaria original.

La Figura 2.11 muestra una imagen binaria en la cual se ha reducido considerablemente el ruido por medio de operaciones morfológicas y un relleno de imagen.

Aun con el tratamiento a la imagen binarizada, no se puede realizar una detección certera de tomates que se encuentren en contacto con otros. En la Figura 2.12 se pueden observar algunos casos que evitan que la detección del tomate sea adecuada.



Figura 2.12. Detección de tomates sin eliminar contornos.

2.6. Detección de tomates muy cercanos entre ellos

El problema que se pretende atacar ahora es la detección de tomates muy cercanos o que se sobrepongan unos a otros. Para este caso se realiza una eliminación de contornos de la imagen binarizada, un proceso similar al que se expresa en [35].

Se eliminan de uno a tres contornos de la imagen binaria, esto con el fin de poder separar los contornos de los tomates que se encuentren juntos. Para el caso de esta imagen de prueba se recortan dos contornos de la imagen binaria.

Comparando las Figuras 2.12 y 2.13 se puede observar una diferencia significativa entre la detección de tomates sin recortar contornos, y la detección de tomates recortando contornos de cada tomate en la imagen. Es importante tomar en cuenta que, si se recortan contornos en exceso de la imagen binarizada, algunos centros geométricos pueden perderse durante el proceso de tratamiento de imágenes.



Figura 2.13. Detección de tomates eliminando contornos.

Cabe mencionar que la detección de tomates en imágenes es una actividad complicada, y se espera que al menos un tomate pueda ser identificado de manera exitosa.

2.7. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de imágenes

El proceso de tratamiento de imágenes descrito anteriormente es extendido para el uso de dos cámaras digitales. El proceso completo es descrito en el diagrama de flujo que se ilustra en la Figura 2.14.

El proceso es descrito desde el momento en el que se abren las cámaras digitales por medio del IDE Microsoft Visual Studio y de la librería OpenCV. Explica la asignación de valores H, S y V como rangos para la segmentación de imagen.

Posteriormente a la segmentación de imagen se realiza el proceso de eliminación de ruido, la eliminación de contornos para tomates cercanos unos a otros y la decisión de seguir con el proceso de tratamiento de imágenes.

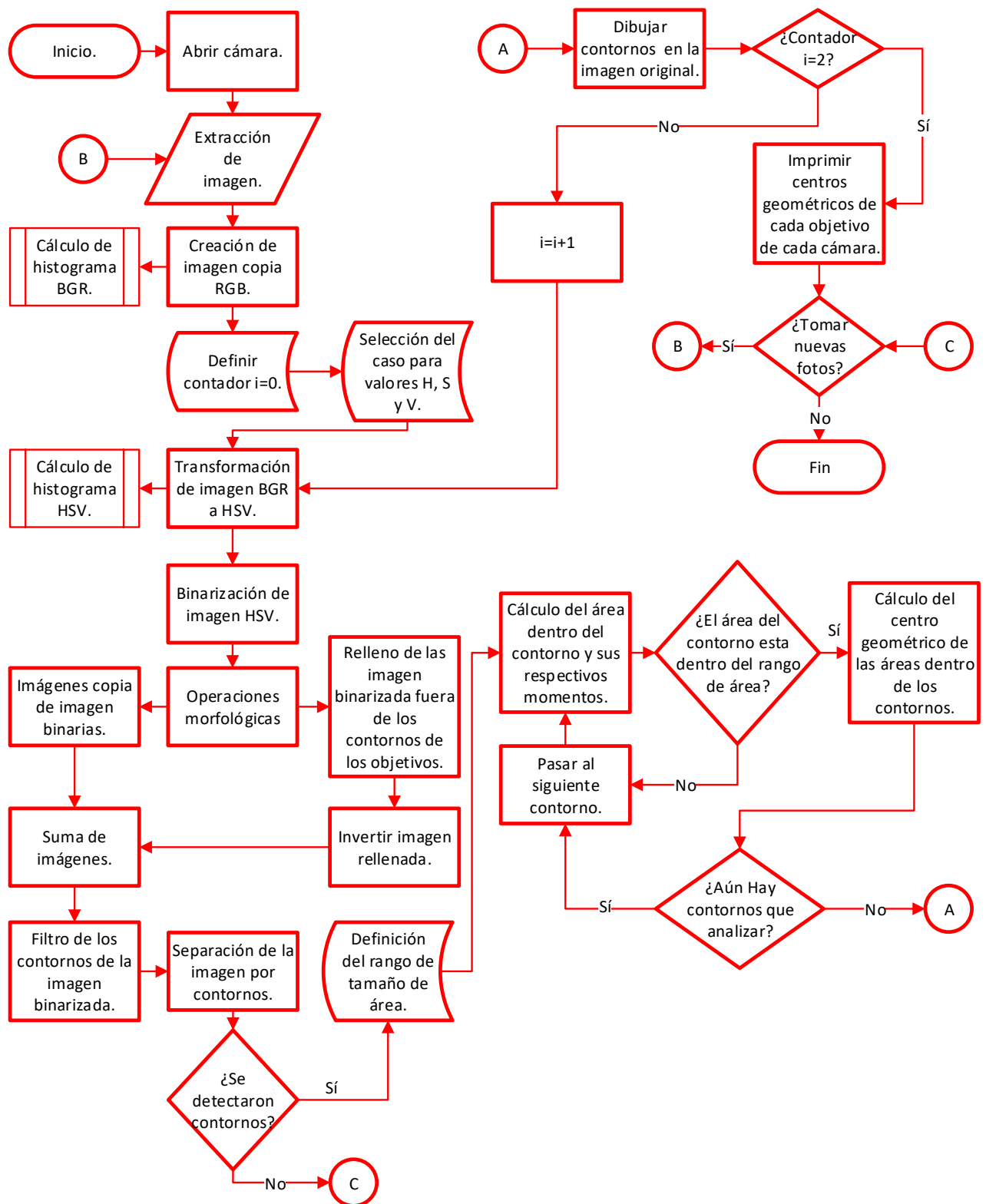


Figura 2.14. Diagrama de flujo del sistema de detección de tomates.

2.8. Referencia de las coordenadas de los tomates respecto al centro de la imagen

Un proceso que ya no se encuentra dentro de lo que es el tratamiento de imágenes es el trasladar las coordenadas de los tomates en la imagen. Esto debido a que las coordenadas están dadas respecto al sistema (u, v) en la imagen (Figura 2.15) y para poder implementar esta metodología de manipulación en espacio de cámara es necesario tener estas coordenadas respecto al centro de la imagen (x_c, y_c) .

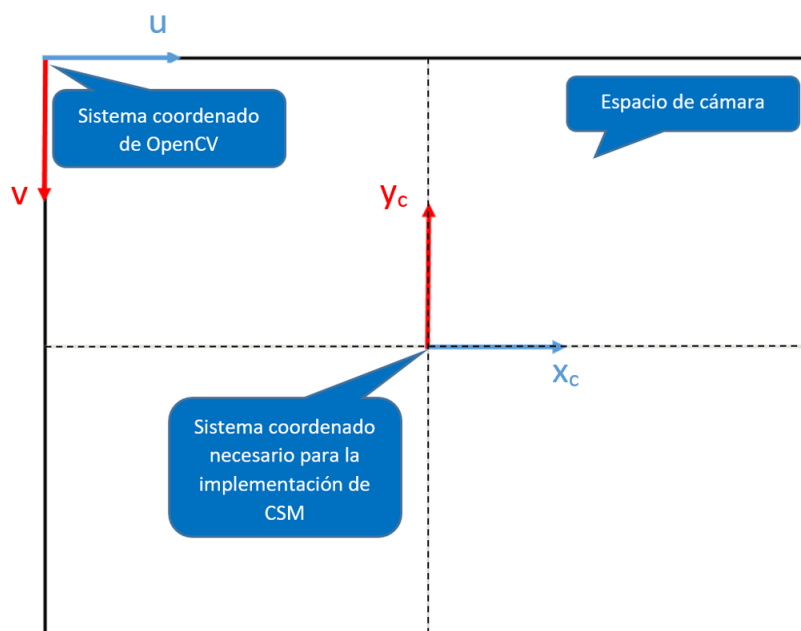


Figura 2.15. Sistemas coordenados de trabajo en la imagen.

por lo tanto se realiza una transformación de coordenadas descrita en las ecuaciones 2.1 y 2.2 la cual consiste en una rotación de 180 grados alrededor del eje u y una traslación.

$$x_c = u - (I_w/2) \quad (2.1)$$

$$y_c = -v + (I_h/2) \quad (2.2)$$

Donde I_w y I_h se refieren a los valores de ancho y alto de la imagen dados en pixeles. De esta manera se tienen las coordenadas de los tomates respecto al centro de la imagen.

2.9. Detección de tomates en invernadero

Para la detección de tomates se crean tres casos de rangos de Matiz, Saturación y Valor, esto con el fin de abarcar distintos rangos de iluminación en los que puede caer el color de los tomates. La iluminación de cada tomate está dada principalmente por los rangos de Saturación y Valor, por lo tanto, el rango del Matiz permanece constante. Los rangos que se muestran en la Tabla 2.4 son rangos obtenidos realizando el tratamiento de imágenes a más doscientas veinte fotografías de tomates en invernadero.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Matiz	0-20	0-20	0-20
Saturación	130-255	130-255	120-200
Valor	170-255	80-170	55-150

Tabla 2.4. Valores de Matiz de colores básicos.

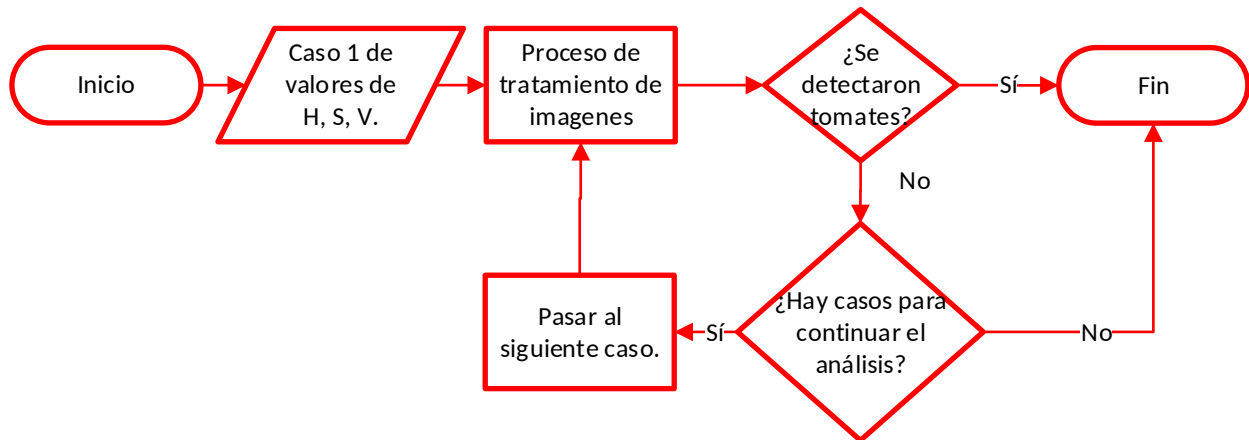


Figura 2.16. Diagrama de programación de los diferentes casos.

Los tres casos se utilizan para diferenciar cada imagen por su iluminación y así detectar las zonas de mayor luz en los tomates, esto con el fin de separar tomates que estén juntos y se hagan sombra en parte de su perímetro. Los casos son programados de tal manera que el análisis de la imagen se realice con cada caso hasta encontrar un contorno con el tamaño

correspondiente a un tomate que está entre 30 y 60 cm de distancia de la cámara. El diagrama de la programación de los casos se muestra en la figura 2.16.

Para realizar la detección de tomates se tomaron fotografías en un invernadero a una distancia entre 30 y 60 cm del tomate, con esto se obtiene un rango de tamaño de los tomates en la imagen de 9000 a 15000 píxeles.

En la Figura 2.17 se muestran imágenes en las cuales se detectó de manera exitosa al menos un tomate. Se puede considerar una detección exitosa si el centro estimado del tomate no se encuentra muy cercano a la orilla de éste.



Figura 2.17. Detección exitosa de tomates en invernadero.

En la Figura 2.18 se muestran imágenes donde la detección del tomate no es exitosa o no se realiza debido a los niveles de luz no detectados dentro de los rangos de H, S y V.



Figura 2.18. Detección errónea de tomates en invernadero.

En el 75 % de las fotos analizadas se detecta al menos un tomate de manera exitosa. En los casos donde no se detecta un tomate de manera exitosa se identifican algunos factores comunes que impiden la detección:

- Poca iluminación en el entorno del tomate.
- Tomates poco visibles u ocultos por ramas.
- Difícil distinción entre contornos de tomates muy cercanos o que se tocan entre ellos.
- Identificación errónea de ramas u hojas marchitas.
- Tamaño del tomate en la imagen menor al tamaño de búsqueda.
- Error al rellenar la imagen para evitar rangos de luz fuera de los establecidos.

2.10. Conclusiones del capítulo 2

Una de las tareas más difíciles de realizar dentro del tratamiento de imágenes es el separar objetos parecidos y muy cercanos, tal es el caso de los tomates juntos en racimos. No solamente el problema recae en los distintos niveles de iluminación que se pueden presentar en una sola imagen, sino también en la gran variedad de algoritmos que se pueden utilizar para resolver una misma tarea.

Debido a la complejidad del problema de detección de hortalizas en la gran mayoría de sistemas de visión solo se realiza una simple segmentación de imagen en un espacio HSV y se realiza la detección de objetivos que se encuentran solos o muy distantes unos de otros. Esto explica el porqué en una gran variedad de artículos se encuentran eficiencias tan altas en la detección de objetivos.

Cabe destacar que el algoritmo de detección de tomates presente en este proyecto de tesis no solamente realiza un filtrado de valores H, S y V como en una gran cantidad de trabajos de tratamiento de imágenes, si no que se realizan diversos algoritmos para una separación y detección de objetivos de manera automática.

A pesar de que el sistema de visión tiene una eficiencia relativamente baja en la detección de hortalizas (75 %) se resalta el hecho de que el algoritmo cumple con su objetivo de detectar tomates juntos en un gran porcentaje de los casos y de ser solamente tomates separados, el porcentaje de detección exitosa de hortalizas puede llegar a ser similar a la de los sistemas de visión presentados en el capítulo 1 .

Una de las ventajas más importantes que se tienen para evitar los factores que dificultan la detección del tomate, es el uso de la metodología de CSM para sistemas de visión en configuración cámara en mano, la cual permite observar los tomates desde distintos ángulos de cámara.

Manipulación en espacio de cámara para sistemas cámara en mano

El sistema de visión desarrollado en este proyecto de tesis tiene como principal característica el uso de una configuración cámara en mano, usando como principales componentes un robot industrial y dos cámaras web. Dicho sistema se basa en la metodología de control por visión de manipulación en espacio de cámara (CSM).

Debido a que la metodología de CSM solo ha sido desarrollada para el uso de cámaras fijas observando al espacio de trabajo del robot, es necesario el planteamiento de nuevos conceptos de manera que se pueda extender dicha metodología para su aplicación a un concepto de cámara en mano.

3.1. Modelo cinemático directo del Robot Fanuc LR Mate 200iC

El robot industrial utilizado en el presente proyecto de tesis es el robot Fanuc LR Mate 200iC (Figura 3.1a), el cual consta de seis grados de libertad para generar un movimiento deseado. Una característica de los robots Fanuc, que es específica de este fabricante, es el comportamiento de una articulación con configuración en paralelo presente generalmente en la junta dos del robot (Figura 3.3). Debido al uso de la metodología de manipulación en espacio de cámara, es necesario hacer uso del modelo cinemático directo para el control del robot.

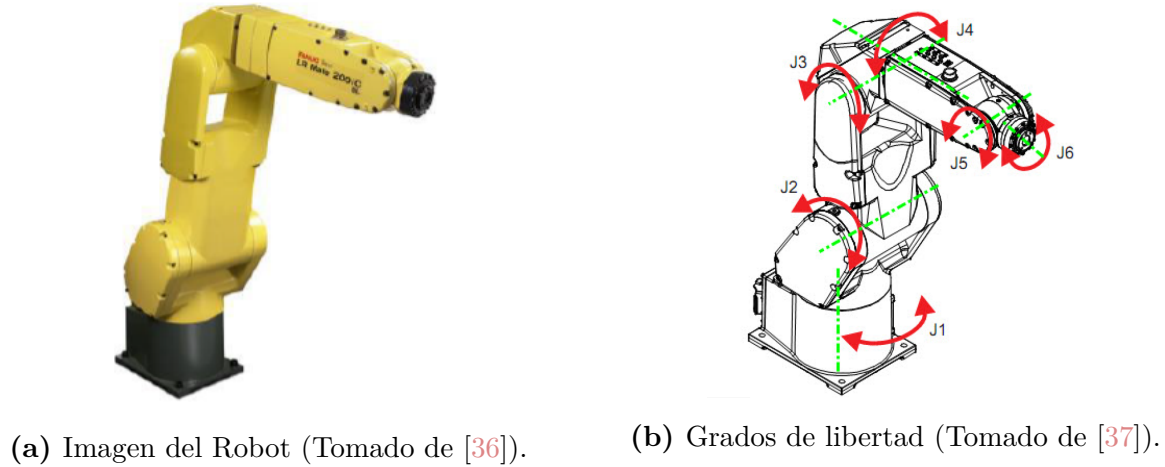


Figura 3.1. Robot Fanuc LR Mate 200iC.

Los manipuladores industriales están conformados de eslabones conectados por juntas teniendo como resultado una cadena cinemática abierta. El robot Fanuc LR Mate 200iC es un manipulador de tipo antropomórfico de seis grados de libertad accionado por servomotores (Figura 3.1b), lo cual lo hace un buen candidato para realizar tareas de recolección de hortalizas en invernadero.

El desarrollo de una metodología de control por visión requiere el conocimiento de un modelo que describa el movimiento cinemático del robot a controlar. Por medio del desplazamiento de las juntas del robot, el modelo cinemático permite obtener de manera confiable la posición y orientación del efector final.

Las primeras tres juntas cintura (J_1), hombro (J_2) y codo (J_3) son, en general, necesarias para posicionar al manipulador, y las últimas tres juntas que conforman la muñeca (J_4 , J_5 y J_6) son requeridas para dar orientación al efector final. Se puede observar que la muñeca tiene una configuración esférica (RRR), es decir que los ejes de giro de las juntas se intersectan en un mismo punto.

Este análisis requiere de la designación de un sistema coordenado unido a cada eslabón, y de una referencia que generalmente está situada en la base del robot. Se emplea el concepto de transformación homogénea para describir, con respecto a un sistema de referencia, la posición y orientación de los eslabones que componen el brazo del robot [2].

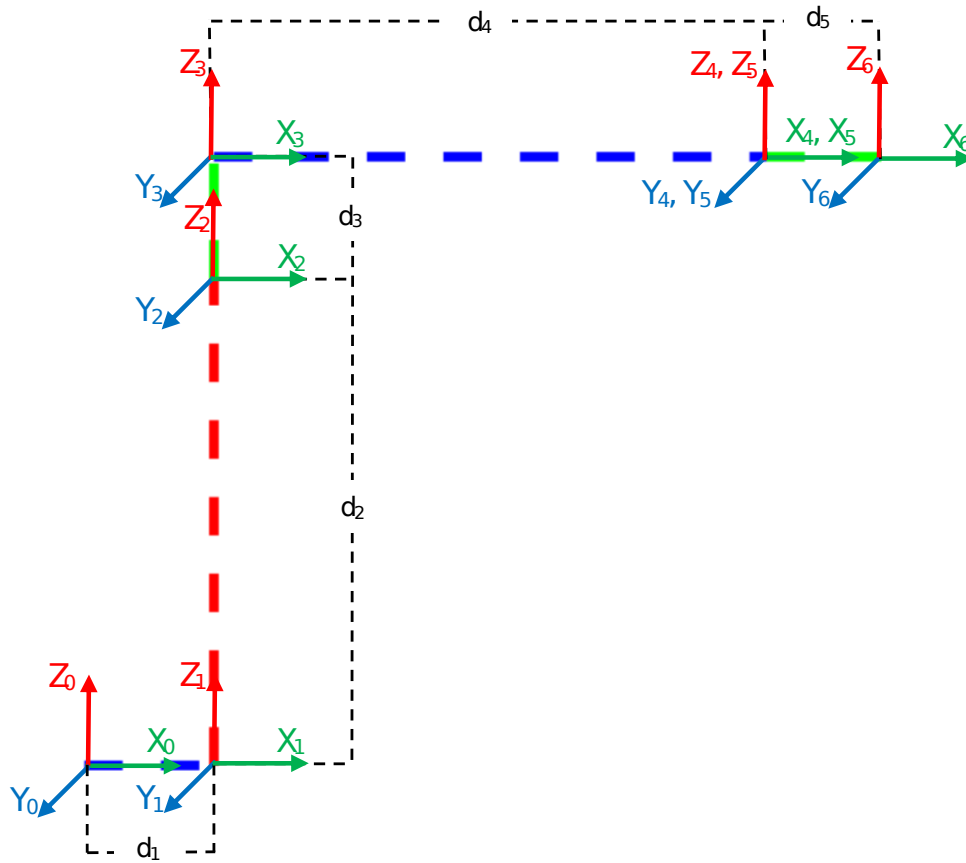


Figura 3.2. Diagrama utilizado para la obtención del modelo cinemático del robot industrial.

En la Figura 3.2 se puede observar la posición y orientación de los ejes coordenados que corresponden a cada junta del robot manipulador, además se muestran los parámetros d_1 , d_2 , d_3 , d_4 y d_5 que representan las longitudes de los eslabones del robot industrial.

En la Tabla 3.1 se muestran las longitudes de los eslabones de robot manipulador.

Parámetro	Magnitud (mm)
d_1	75
d_2	300
d_3	75
d_4	320
d_5	80

Tabla 3.1. Longitudes de los eslabones del robot industrial.

El desarrollo del modelo cinemático del robot hace uso de las matrices de transformación homogéneas.

La relación matricial $Rot(x, \theta)$ corresponde a la rotación alrededor del eje x.

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\theta & S_\theta & 0 \\ 0 & -S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La relación matricial $Rot(y, \theta)$ representa una rotación alrededor del eje y.

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La relación matricial $Rot(z, \theta)$ representa una rotación alrededor del eje z.

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} C_\theta & S_\theta & 0 & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

La última relación matricial corresponde a una traslación en los ejes x , y , z en cantidades d_x , d_y , d_z respectivamente.

$$Trans(dx, dy, dz) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Cabe mencionar que C_θ y S_θ se refieren a $\cos\theta$ y $\sin\theta$ en notación compacta, respectivamente, esto para evitar errores en ecuaciones muy grandes.

La transformación homogénea A_i es aquella que relaciona al sistema coordenado i con el sistema coordenado $(i-1)$. Para el caso de la primera junta relacionamos el marco de referencia 1 con el marco de referencia 0, esta relación se expresa como se ve en la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = A_1(\theta_1) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, A_1(\theta_1) = Rot(z, \theta_1) * Trans(d_1, 0, 0) \quad (3.5)$$

Para la transformación homogénea A_2 es necesario tomar en cuenta que al desplazar la junta número dos un ángulo θ_2 , la junta número tres también rota un ángulo θ_2 pero en sentido contrario. Este movimiento se debe a la configuración de paralelogramo a la que está sujeta el segundo eslabón del robot industrial; esta rotación de valor $-\theta_2$ no queda registrado en el parámetro J3 del control del robot.

La matriz homogénea A_2 se modela como una traslación que depende del ángulo θ_2 :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = A_2(\theta_2) \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, A_2(\theta_2) = Trans(d_2 * \sin(\theta), 0, d_2 * \cos(\theta_2)) \quad (3.6)$$

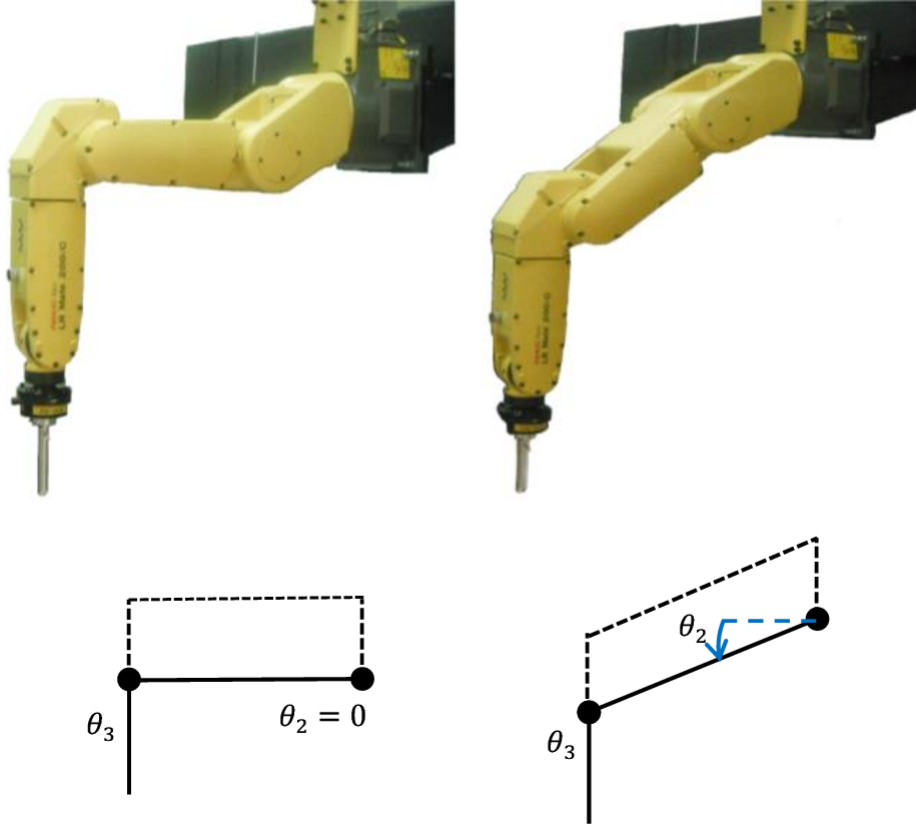


Figura 3.3. Configuración de paralelogramo en la segunda junta del robot Fanuc LR Mate 200iC (Modificado de [2]).

La tercera transformación homogénea es aquella que relaciona al sistema coordenado 3 con el sistema coordenado 2. Esta transformación se expresa en la ecuación (3.7) e implica una rotación sobre el eje y un valor de $-\theta_3$ seguida de una traslación en el eje z una cantidad de d_3 .

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = A_3(\theta_3) \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix}, A_3(\theta_3) = Rot(y, -\theta_3) * Trans(0, 0, d_3) \quad (3.7)$$

Las transformaciones siguientes son calculadas de manera similar a A_3 . A continuación se muestran las relaciones entre los sistemas coordenados siguientes.

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = A_4(\theta_4) \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix}, A_4(\theta_4) = Rot(x, -\theta_4) * Trans(d_4, 0, 0) \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix} = A_5(\theta_5) \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ 1 \end{bmatrix}, A_5(\theta_5) = Rot(y, -\theta_5) \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ 1 \end{bmatrix} = A_6(\theta_6) \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix}, A_6(\theta_6) = Rot(x, -\theta_6) * Trans(d_5, 0, 0) \quad (3.10)$$

Las matrices A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 y A_6 se usan para describir la posición y orientación del extremo libre del robot con respecto al eje coordenado de la base del manipulador (X_0, Y_0, Z_0) . La matriz homogénea que relaciona al sistema coordenado asociado al efector final con el sistema coordenado en la base del manipulador (x_0, y_0, z_0) es la siguiente.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = A(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Donde:

$$A(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)A_4(\theta_4)A_5(\theta_5)A_6(\theta_6) \quad (3.12)$$

De esta manera se tiene el modelo cinemático del robot industrial propuesto para el desarrollo del sistema de visión.

3.2. Metodología de manipulación en espacio de cámara con modelo de cámara lineal

Como se mencionó anteriormente, el método de manipulación en espacio de cámara es una técnica que usa visión por computadora y que no requiere de un proceso de calibración ni del manipulador ni del sistema de visión.

Puesto que este problema de colocación es básico para muchas operaciones de manufactura, ensamblaje y manejo de materiales, puede considerarse al método de manipulación del espacio de cámara como una alternativa viable a la operación tradicional de robots de “enseñanza y repetición”.

Una característica importante del método es que los objetivos de la maniobra se definen y se persiguen en el marco de referencia de las imágenes bidimensionales obtenidas por medio de cada una de las cámaras participantes. Estos objetivos se establecen usando los “parámetros de visión”, los cuales se determinan por medio de un proceso de estimación lineal. Estos parámetros definen una relación algebraica no lineal entre la configuración interna del robot y la localización correspondiente, en el espacio de la cámara.

Antes de iniciar una tarea de posicionamiento, se requiere de una determinación inicial de parámetros de visión, la cual se realiza con un marco de puntos definidos respecto a la base del robot y se toman medidas de la posición de los puntos en la imagen respecto a un sistema ubicado en el centro de la imagen de cada cámara. Los parámetros de visión se determinan independientemente para cada cámara mediante un proceso de estimación lineal que combina la información de los puntos referidos a la base del manipulador. En general se garantiza una determinación precisa de los parámetros al considerar muestras obtenidas dentro del espacio de trabajo del manipulador [38].

En la Figura 3.4 se muestra más a detalle los pasos a seguir para el desarrollo de un sistema de visión bajo esta metodología.

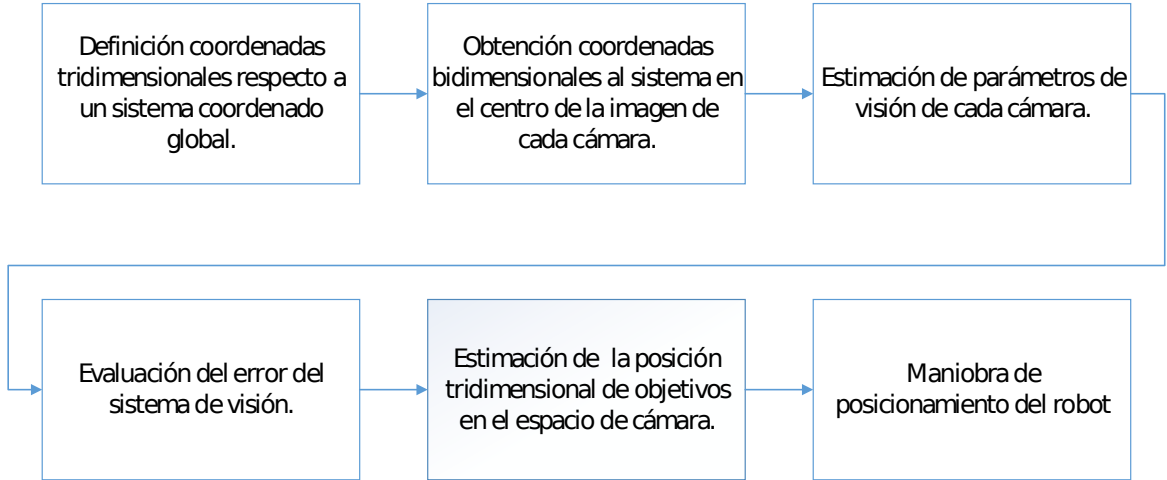


Figura 3.4. Pasos a seguir de la metodología de manipulación en espacio de cámara.

3.2.1. Modelo de perspectiva

Para la obtención de un modelo de once parámetros lineales (LCM-CSM), descrito en [19], es necesario el uso de una proyección de perspectiva descrita por medio del modelo de cámara de orificio. Cuando un punto de coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) referidas a un sistema de coordenadas unidas a la cámara es detectado, las coordenadas del punto correspondiente en el plano de la imagen (x_{ci}, y_{ci}) , como se presenta en la Figura 3.5, pueden modelarse de manera muy precisa usando una proyección en perspectiva descrito por las siguientes ecuaciones:

$$x_{ci} = f \frac{X_i}{Z_i} \quad , \quad y_{ci} = f \frac{Y_i}{Z_i} \quad (3.13)$$

Donde f es la longitud focal efectiva de la cámara. Note que el eje Z está dirigido en la dirección del eje óptico de la cámara. Los puntos especificados en el marco de referencia unido a la cámara pueden referirse a un segundo sistema coordenado (x, y, z) usando la relación:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^2 + e_2^2 - e_3^2 - e_4^2 & 2(e_2e_3 + e_1e_4) & 2(e_2e_4 - e_1e_3) & X_0 \\ 2(e_2e_3 - e_1e_4) & e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 - e_4^2 & 2(e_3e_4 + e_1e_2) & Y_0 \\ 2(e_2e_4 + e_1e_3) & 2(e_3e_4 - e_1e_2) & e_1^2 - e_2^2 - e_3^2 + e_4^2 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

En la cual las cantidades $e_1, \dots, e_4$ representan los cuatro parámetros de Euler, los cuales satisfacen la restricción $e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 = 1$. Esta transformación permite localizar el origen del sistema de coordenadas (x, y, z) relativo al sistema de coordenadas en la cámara (X, Y, Z) [38].

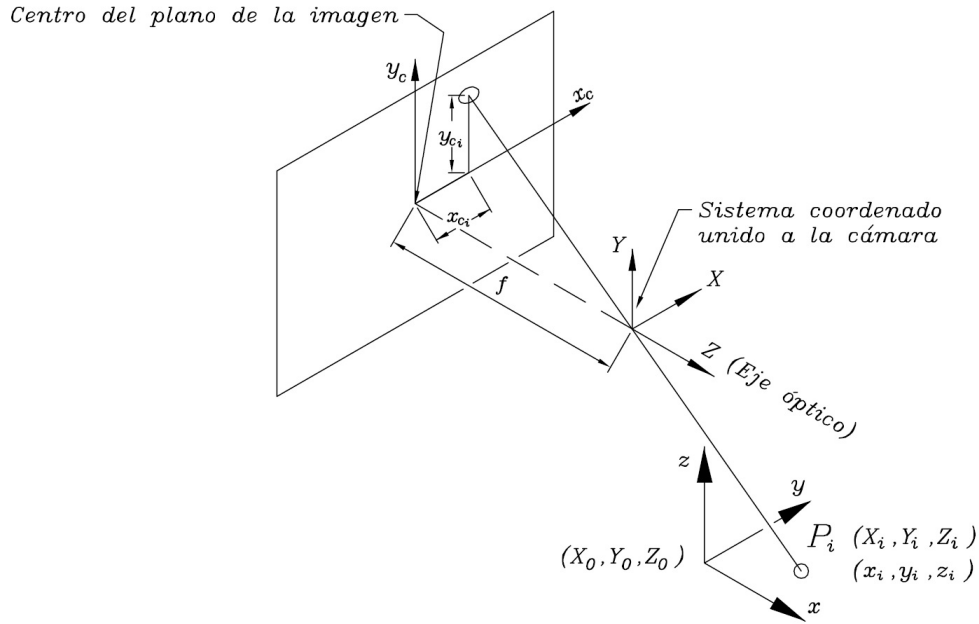


Figura 3.5. Sistema de referencia unido a la cámara (Tomado de [38]).

La ecuación 3.14 se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & X_0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & Y_0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Y las coordenadas (x_{ci}, y_{ci}) quedan descritas como:

$$x_{ci} = f \frac{R_{11}x_i + R_{12}y_i + R_{13}z_i + X_0}{R_{31}x_i + R_{32}y_i + R_{33}z_i + Z_0}, \quad y_{ci} = f \frac{R_{21}x_i + R_{22}y_i + R_{23}z_i + Y_0}{R_{31}x_i + R_{32}y_i + R_{33}z_i + Z_0} \quad (3.16)$$

3.2.2. Modelo lineal de manipulación en espacio de cámara

Dividiendo el numerador y el denominador de las coordenadas en la imagen (x_{ci}, y_{ci}) entre Z_0 se obtiene:

$$x_{ci} = f \frac{(R_{11}x_i + R_{12}y_i + R_{13}z_i + X_0) \frac{1}{Z_0}}{(R_{31}x_i + R_{32}y_i + R_{33}z_i + Z_0) \frac{1}{Z_0}} = \frac{P_{11}x_i + P_{12}y_i + P_{13}z_i + P_{14}}{P_{31}x_i + P_{32}y_i + P_{33}z_i + 1} \quad (3.17)$$

$$y_{ci} = f \frac{(R_{21}x_i + R_{22}y_i + R_{23}z_i + Y_0) \frac{1}{Z_0}}{(R_{31}x_i + R_{32}y_i + R_{33}z_i + Z_0) \frac{1}{Z_0}} = \frac{P_{21}x_i + P_{22}y_i + P_{23}z_i + P_{24}}{P_{31}x_i + P_{32}y_i + P_{33}z_i + 1} \quad (3.18)$$

Donde:

$$\begin{aligned} P_{11} &= \frac{f}{Z_0} R_{11} & P_{21} &= \frac{f}{Z_0} R_{21} & P_{31} &= \frac{1}{Z_0} R_{31} \\ P_{12} &= \frac{f}{Z_0} R_{12} & P_{22} &= \frac{f}{Z_0} R_{22} & P_{32} &= \frac{1}{Z_0} R_{32} \\ P_{13} &= \frac{f}{Z_0} R_{13} & P_{23} &= \frac{f}{Z_0} R_{23} & P_{33} &= \frac{1}{Z_0} R_{33} \\ P_{14} &= \frac{f}{Z_0} X_0 & P_{24} &= \frac{f}{Z_0} Y_0 & & \end{aligned}$$

Multiplicando ambos lados de las ecuaciones (3.17) y (3.18) por el denominador se llega al siguiente planteamiento:

$$P_{31}x_{ci}x_i + P_{32}x_{ci}y_i + P_{33}x_{ci}z_i + x_{ci} = P_{11}x_i + P_{12}y_i + P_{13}z_i + P_{14} \quad (3.19)$$

$$P_{31}y_{ci}x_i + P_{32}y_{ci}y_i + P_{33}y_{ci}z_i + y_{ci} = P_{21}x_i + P_{22}y_i + P_{23}z_i + P_{24} \quad (3.20)$$

Y despejando x_{ci} y y_{ci} de las ecuaciones (3.19) y (3.20) respectivamente se llega al modelo que se muestra a continuación:

$$x_{ci} = P_{11}x_i + P_{12}y_i + P_{13}z_i + P_{14} - P_{31}x_{ci}x_i - P_{32}x_{ci}y_i - P_{33}x_{ci}z_i \quad (3.21)$$

$$y_{ci} = P_{21}x_i + P_{22}y_i + P_{23}z_i + P_{24} - P_{31}y_{ci}x_i - P_{32}y_{ci}y_i - P_{33}y_{ci}z_i \quad (3.22)$$

Acomodando las ecuaciones anteriores de manera matricial y realizando una expansión para m número de mediciones se tiene:

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ . \\ . \\ . \\ x_{cm} \\ y_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{c1}x_1 & -x_{c1}y_1 & -x_{c1}z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -y_{c1}x_1 & -y_{c1}y_1 & -y_{c1}z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & z_m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{cm}x_m & -x_{cm}y_m & -x_{cm}z_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & y_m & z_m & 1 & -y_{cm}x_m & -y_{cm}y_m & -y_{cm}z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} \\ P_{21} \\ P_{22} \\ P_{23} \\ P_{24} \\ P_{31} \\ P_{32} \\ P_{33} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

De esta manera se tiene un modelo de la forma:

$$Y = AX \quad (3.24)$$

Con el cual se puede realizar una estimación de mínimos cuadrados, como la descrita en [38], para encontrar los valores óptimos de $X = [P_{11}, \dots, P_{33}]$ como se muestra en la ecuación (14):

$$\hat{\mathbf{X}} = [A^T W A]^{-1} [A^T W Y] \quad (3.25)$$

La matriz W es una matriz de los pesos asociados a cada medición realizada para la convergencia del modelo.

Para obtener $\hat{\mathbf{X}}$ es necesario resolver $[A^T W A]$ y $[A^T W Y]$. Esta multiplicación de matrices queda definida como se muestra en las ecuaciones 3.26 y 3.31. Esta definición de las matrices de momento de LCM-CSM es similar a la vista en [39] con el modelo clásico de CSM.

$$A^T W A = \begin{bmatrix} M_1 & 0_{(4 \times 4)} & M_2 \\ 0_{(4 \times 4)} & M_1 & M_3 \\ M_2^T & M_3^T & M_4 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Donde W es la matriz diagonal de pesos, $0_{(4 \times 4)}$ son matrices de ceros de tamaño 4×4 y M_1 a M_4 son matrices de momentos descritas en las ecuaciones 3.27 a 3.30 respectivamente.

$$M_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m x_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m x_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m y_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m y_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m y_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m z_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_i w_i & \sum_{i=1}^m y_i w_i & \sum_{i=1}^m z_i w_i & \sum_{i=1}^m w_i \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$M_2 = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} y_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} y_i z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} y_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} z_i^2 w_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} y_i w_i & \sum_{i=1}^m x_{ci} z_i w_i \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$M_3 = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} y_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} y_i z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} y_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} z_i^2 w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} y_i w_i & \sum_{i=1}^m y_{ci} z_i w_i \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) x_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) x_i z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) x_i y_i w_i & \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) y_i^2 w_i & \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) y_i z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) x_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) y_i z_i w_i & \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) z_i^2 w_i \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$A^T W Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_{ci} x_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ci} y_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ci} z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m x_{ci} w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} x_i w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} y_i w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} z_i w_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ci} w_i \\ - \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) x_i w_i \\ - \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) y_i w_i \\ - \sum_{i=1}^m (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) z_i w_i \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

3.3. Estimación de la posición tridimensional de un objeto dentro del espacio de cámara

La posición tridimensional de un punto dentro del espacio observado por varias cámaras puede obtenerse al minimizar la función descrita como ϕ en la siguiente expresión.

$$\phi = \sum_{k=1}^{n_c} [x_c^{(k)} - f_x(x, y, z; P^{(k)})]^2 + [y_c^{(k)} - f_y(x, y, z; P^{(k)})]^2 \quad (3.32)$$

Donde:

$$f_x(x, y, z; P^{(k)}) \equiv (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})x + (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})y + (P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)})z + P_{14}^{(k)} \quad (3.33)$$

$$f_y(x, y, z; P^{(k)}) \equiv (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})x + (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})y + (P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)})z + P_{24}^{(k)} \quad (3.34)$$

Las variables x, y, z simbolizan la posición tridimensional de un objeto dentro del espacio de visión de las cámaras, P representa el vector de parámetros asociado a cada cámara y el superíndice (k) define las mediciones y parámetros de visión asociados con la $k^{\text{ésima}}$ cámara. La suma se realiza hasta n_c que es el número de cámaras apuntando al mismo punto objetivo.

La condición necesaria para la minimización de la función escalar ϕ , conduce a la solución para (x, y, z) en la ecuación (3.36):

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = B^{-1}V \quad (3.36)$$

Donde B es una matriz simétrica cuyos componentes se describen como:

$$\begin{aligned}
B_{11} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})^2 + (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})^2 \\
B_{12} = B_{21} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})(P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)}) + (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})(P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)}) \\
B_{13} = B_{31} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})(P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)}) + (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})(P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)}) \\
B_{22} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})^2 + (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})^2 \\
B_{23} = B_{32} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})(P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)}) + (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})(P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)}) \\
B_{33} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)})^2 + (P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)})^2
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Y los componentes del vector V son:

$$\begin{aligned}
V_1 &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})(x_c^{(k)} - P_{14}^{(k)}) + (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})(y_c^{(k)} - P_{24}^{(k)}) \\
V_2 &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})(x_c^{(k)} - P_{14}^{(k)}) + (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})(y_c^{(k)} - P_{24}^{(k)}) \\
V_3 &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)})(x_c^{(k)} - P_{14}^{(k)}) + (P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)})(y_c^{(k)} - P_{24}^{(k)})
\end{aligned} \tag{3.38}$$

La configuración del robot de 6 grados de libertad se evalúa utilizando el modelo cinemático inverso del robot, disponible en el controlador del mismo, de manera que se asegura el posicionamiento del efector final manteniendo una orientación fija de la herramienta del robot respecto al sistema coordenado unido a la base del mismo.

3.4. Manipulación en espacio de cámara para un sistema de visión con configuración de cámara en mano

Como se expresa en [40] y en [41] existen dos tipos de configuraciones típicas dentro de los sistemas visión: cámara fija y cámara en mano. La diferencia principal entre estas configura-

ciones radica en la ubicación de las cámaras respecto al actuador del robot. Mientras que en la configuración cámara fija se tienen cámaras fijas observando casi la totalidad del espacio de trabajo del robot, en la configuración cámara en mano se tienen cámaras montadas en el efector final del robot observando sólo una porción del espacio de trabajo de éste, como se ejemplifica en la figura a continuación donde se muestra un esquema con la diferencia en la posición de las cámaras según la configuración del sistema de visión.

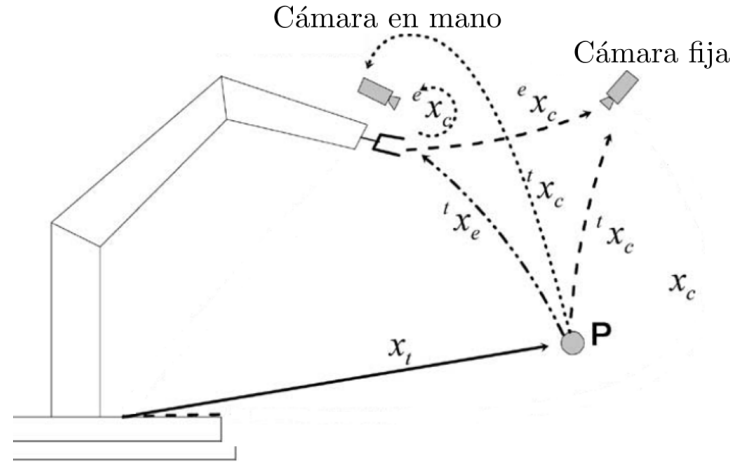


Figura 3.6. Comparación entre configuraciones cámara en mano y cámara fija (Tomado de [40]).

Para este proyecto es esencial el desarrollo de un sistema de visión en configuración cámara en mano debido a la necesidad de poder detectar objetos que pueden estar ocultos del espacio de visión de las cámaras y por lo tanto es necesario obtener diferentes puntos de vista de un mismo espacio de trabajo. Este sistema de visión cámara en mano se desarrolla bajo la metodología de manipulación en espacio de cámara.

3.4.1. Obtención de un marco de puntos móviles unido al efector final del manipulador

Como se mencionó previamente, la característica principal de un sistema con configuración cámara en mano consiste en montar cámaras en el extremo del robot. Estas cámaras solo pueden observar una porción del espacio de trabajo del robot industrial, por lo cual el espacio de cámara del sistema de visión es reducido, además de que los puntos muestra no pueden ser generados por medio del robot como normalmente se hace. Por este motivo se

vuelve necesario el uso de un patrón de puntos para realizar la estimación de parámetros de visión de las cámaras involucradas en el sistema. Dicho patrón de puntos se sitúa dentro del espacio de trabajo del robot y debe ser observado por las dos cámaras colocadas en el efector final del robot.

Se propone colocar un marco de tres planos dentro del espacio de trabajo del robot como se muestra en la Figura 3.7. A dicho marco se le colocan puntos de los cuales su posición tridimensional se mide respecto a la base del robot debido a que es sencillo colocar el efector final del robot sobre cada punto en el marco. Esto ayuda a reducir el error en el sistema debido a un desajuste en la configuración de juntas del robot.



Figura 3.7. Marco de tres planos colocado dentro del espacio de trabajo del robot.

Una vez que las coordenadas tridimensionales de los puntos están referidas a la base del robot, se hace uso del modelo cinemático directo para referir la posición de dichos puntos al sistema coordinado asociado al efector final.

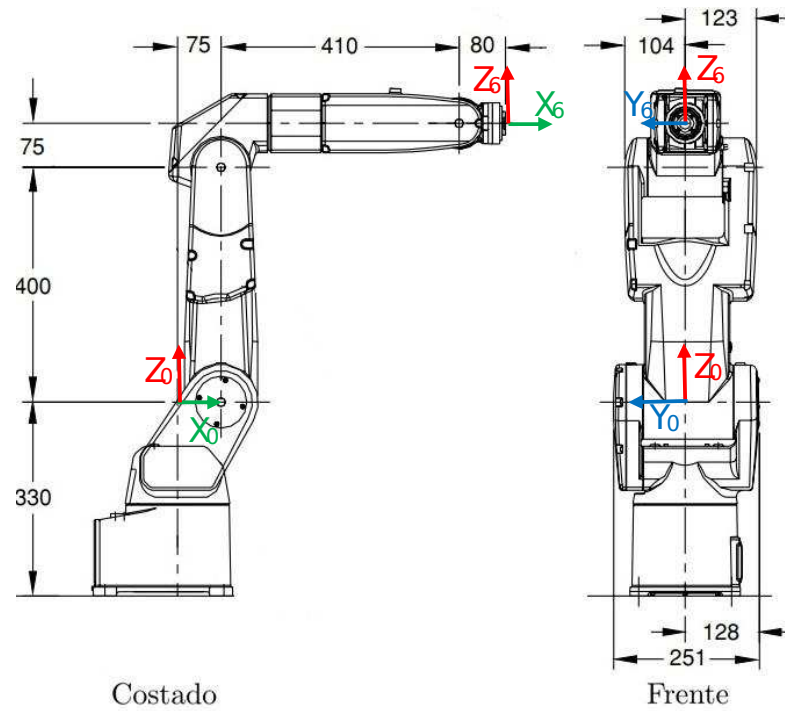
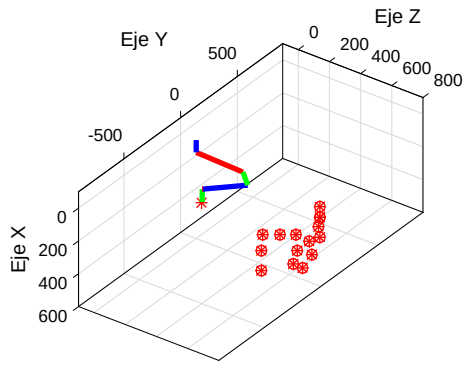


Figura 3.8. Ubicación de los sistemas coordenados en la base del robot y en efector final del robot.

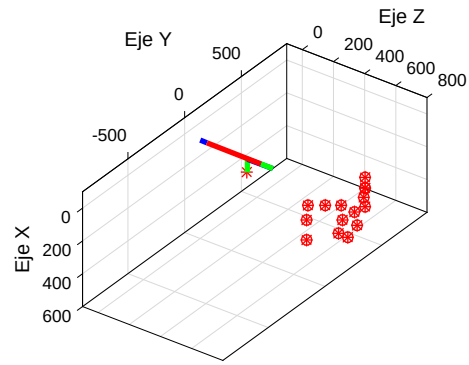
En la Figura 3.8 se observan los sistemas coordenados tanto en la base del robot como el asociado al efector final del robot. Estos marcos están relacionados por medio del modelo cinemático del robot.

Una vez referidas las coordenadas espaciales de los puntos muestra al sistema unido al efector final, se puede fijar el espacio definido por éstos al extremo del robot, como se muestra en la Figura 3.9 la cual ilustra que, al desplazar el efector final a una posición arbitraria, los puntos virtuales se desplazan manteniendo su relación respecto al extremo del robot.

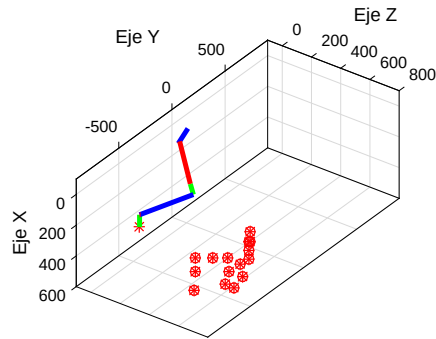
La Tabla 3.2 muestra las configuraciones usadas para la simulación de los puntos unidos al efector final.



(a) Configuración 1.



(b) Configuración 2.



(c) Configuración 3.

Figura 3.9. Simulación del espacio móvil unido al efector final.

Número de junta	Configuración 1 (Grados)	Configuración 2 (Grados)	Configuración 3 (Grados)
J_1	0.000	51.856	-60.042
J_2	2.061	29.118	45.831
J_3	-65.835	-56.044	-44.436
J_4	0.000	-56.934	68.026
J_5	65.835	69.825	69.825
J_6	-132.135	-104.225	-173.6

Tabla 3.2. Valores de junta del robot para cada configuración.

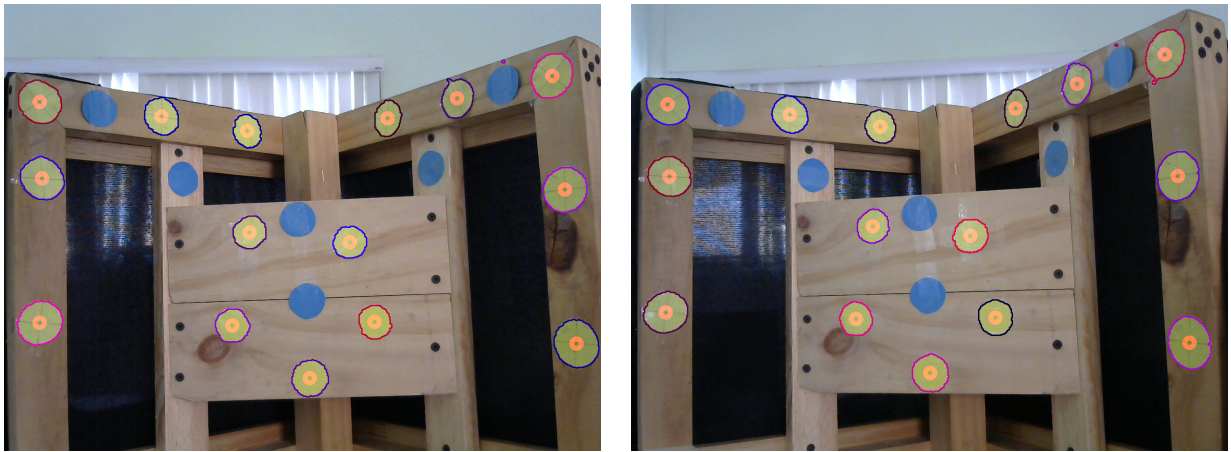
Posición del extremo	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
x	365.213	365.332	365.223
y	0.000	363.224	-494.208
z	38.549	38.546	39.295
w	90.003	90.003	90.003
p	42.136	42.136	42.136
r	90.001	90.001	90.001

Tabla 3.3. Posición y orientación del extremo del robot.

3.4.2. Obtención de puntos 2D fijos a la imagen de las cámaras

La configuración 1 de la Tabla 3.2, es una selección de valores de los ángulos de giro de las juntas del robot tal que las cámaras fijas al efector final observen todos los puntos del marco.

La obtención del centro geométrico de los puntos en el marco, se realiza con un algoritmo simple de segmentación de imagen en un espacio HSV y operaciones morfológicas de apertura y cerradura para eliminar el ruido en la imagen. La Figura 3.10 muestra la localización del centro geométrico de todos los puntos muestra en la imagen de cada cámara.



(a) Cámara L (izquierda).

(b) Cámara R (derecha).

Figura 3.10. Espacio de visión ocupado en las cámaras.

Una vez obtenidas las coordenadas tridimensionales de los puntos muestra respecto al efector final y las coordenadas bidimensionales referidas al sistema en el centro de la imagen, se hace la suposición de que si las cámaras y el espacio definido por los puntos muestra están unidos al efector final, las cámaras observarán siempre los mismos puntos en la misma posición en la imagen (Figura 3.11). Bajo esta suposición es sencillo realizar una estimación de los parámetros de visión usando como referencia el sistema coordenado en el efector final.

Con las coordenadas tridimensionales relacionadas con sus respectivas coordenadas bidimensionales, se realiza la estimación de parámetros de visión para cada cámara.

Una característica importante relacionada a esta metodología es el evitar realizar una estimación de parámetros por cada configuración del robot programada, ya que el espacio de visión de las cámaras se mueve conforme se mueve el efector final.

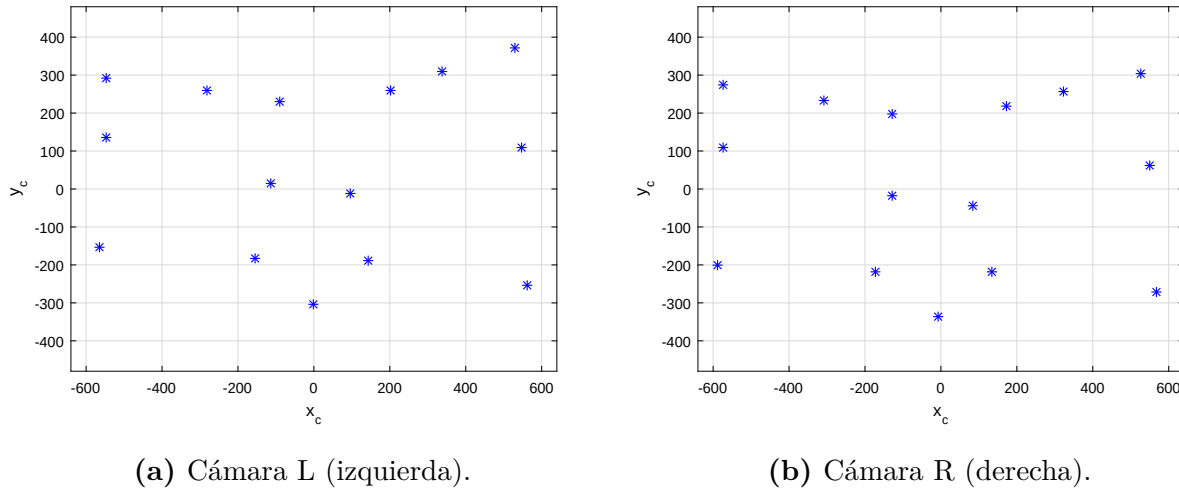


Figura 3.11. Centros geométricos de los puntos muestra.

Una vez realizada la estimación de los parámetros teniendo como referencia el sistema coordinado en el efector, la posición de cualquier punto que este dentro del espacio de cámara estará referida al extremo del robot y, por medio del modelo cinemático directo, es posible referir cualquier posición al sistema coordinado unido a la base del robot.

3.5. Prueba de la metodología EIH-CSM

Los resultados de la prueba mostrada a continuación son usados como una herramienta para analizar el enfoque y la ejecución de la extensión de la metodología descrita anteriormente. También se realiza un análisis del error en el sistema de visión y una prueba de ubicación de objetivos. Para esta prueba se utilizaron dos cámaras Logitech c270 las cuales tienen una resolución máxima de 1280 x 960 pixeles. El modelo de cámara se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Cámara Logitech c270.

3.5.1. Obtención de parámetros de visión

Como primer paso se obtienen las coordenadas de los puntos muestra respecto a la base del robot, esto debido a que el marco físico no cambia de posición respecto a la base del robot. Las coordenadas (x, y, z) de los puntos muestra respecto a la base del robot se muestran en la Tabla 3.4:

Punto	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	481.9310	-207.5210	565.9940
2	363.4690	-203.7500	566.5180
3	272.9120	-199.8610	567.9840
4	271.0370	-147.5630	643.2220
5	269.8270	-98.8270	713.9720
6	273.4990	37.9760	758.0980
7	273.5470	116.8550	704.5410
8	277.6650	208.4950	642.1550
9	341.6670	205.7320	642.3060
10	460.2720	204.6100	640.9300
11	394.1260	-53.2850	685.2180
12	466.7420	-74.6820	681.0870
13	517.4160	-15.4090	691.5350
14	468.0280	53.9270	704.0400
15	382.2660	36.9740	701.2420

Tabla 3.4. Coordenadas x, y, z , de los puntos muestra respecto a la base del robot.

Como se mencionó, la configuración del robot seleccionada en la cual las cámaras observan todos los puntos muestra colocados en el marco se muestra en la Tabla 3.5:

Junta	Giro (Grados)
J_1	0.000
J_2	2.061
J_3	-65.835
J_4	0.000
J_5	65.835
J_6	-132.135

Tabla 3.5. Valores de junta del robot.

Con la configuración del efector final definida, las coordenadas de los puntos muestra respecto a la base del robot se refieren al sistema coordenado unido al extremo del robot.

Las coordenadas tridimensionales de los puntos muestra referidas al sistema coordenado en el efector final se expresan en la siguiente Tabla.

Punto	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	116.7171	530.3564	-199.9610
2	-1.7449	528.2151	-203.1090
3	-92.3019	526.6931	-206.9765
4	-94.1769	547.4014	-296.2346
5	-95.3869	567.1712	-379.8403
6	-91.7149	508.1152	-510.8920
7	-91.6669	415.4808	-533.4557
8	-87.5489	307.7381	-559.5593
9	-23.5469	309.7037	-557.6117
10	95.0581	309.4360	-555.8565
11	28.9121	515.2950	-394.3222
12	101.5281	526.5864	-375.6835
13	152.2021	494.5693	-426.6477
14	102.8141	457.3264	-486.4543
15	17.0521	466.6250	-472.0054

Tabla 3.6. Coordenadas x, y, z de los puntos muestra respecto al sistema en el efector final.

De esta manera se toma el sistema coordenado unido al extremo del robot como el sistema coordenado global del sistema de visión.

La posición 2D de los puntos muestra respecto al sistema en el centro de la imagen de

cada cámara se expresa en la tabla 3.7. Estos puntos son resultado del algoritmo de búsqueda de contornos y detección de centros geométricos descrito en la sección 2.3.

Punto	cámara izquierda (píxeles)		cámara derecha (píxeles)	
	x_c	y_c	x_c	y_c
1	561.2880	-253.7010	567.3040	-271.2750
2	547.1590	107.7750	548.5970	60.6566
3	527.9840	371.1770	525.7040	303.3240
4	336.8010	308.3750	323.2330	257.0320
5	202.0560	260.2050	173.8410	217.7310
6	-91.3528	229.5940	-127.2610	198.4930
7	-280.9990	259.2130	-306.8170	232.6640
8	-546.0960	290.8750	-574.2420	272.8800
9	-546.9550	136.8850	-574.2760	109.7010
10	-563.4510	-154.4660	-588.9120	-201.8260
11	96.5449	-10.4874	85.1857	-44.2417
12	143.5720	-187.8490	135.1960	-217.3880
13	-0.7430	-303.1610	-7.5598	-336.5870
14	-155.5700	-182.7330	-171.1900	-219.6620
15	-113.6790	15.3030	-129.3090	-18.7870

Tabla 3.7. Coordenadas x_c, y_c del centro geométrico de cada punto muestra.

Una vez que se tienen las coordenadas tridimensionales y las coordenadas bidimensionales de cada punto muestra, se realiza la estimación de parámetros para cada cámara. Los parámetros de visión son:

Parámetros de visión	Cámara izquierda (L)	Cámara derecha (R)
P_{11}	0.40564	0.14743
P_{12}	-14.57357	-11.23900
P_{13}	-13.67305	-14.85094
P_{14}	1319.12463	-736.60452
P_{21}	19.93199	18.57295
P_{22}	1.57595	1.65640
P_{23}	-1.06608	-1.11321
P_{24}	-1721.95503	-1473.76827
P_{31}	0.00116	0.00130
P_{32}	-0.01035	-0.01143
P_{33}	0.01045	0.00804

Tabla 3.8. Parámetros de visión de las cámaras en el efector final.

Estos parámetros de visión son válidos para cualquier configuración que puedan tomar las juntas del robot ya que, al realizar la estimación de parámetros respecto al sistema coordinado en el efector final, ninguna de las mediciones involucradas cambia.

3.5.2. Análisis del error del sistema de visión

Ya obtenidos los parámetros de visión se realiza un análisis del error que puede llegar a presentar el sistema de visión en la estimación de la posición de objetivos. Este análisis se muestra en la Tabla que sigue.

Punto	Coordenadas Medidas (mm)			Coordenadas Calculadas (mm)			Error (mm)			Distancia (mm)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	
1	116.71	530.35	-199.96	115.6053	530.09	-200.4118	1.11	0.25	0.45	1.22
2	-1.74	528.21	-203.10	-1.7315	527.87	-202.6987	-0.01	0.34	-0.41	0.53
3	-92.30	526.69	-206.97	-91.7345	527.19	-207.9709	-0.56	-0.50	0.99	1.24
4	-94.17	547.40	-296.23	-94.4435	547.09	-295.7161	0.26	0.30	-0.51	0.65
5	-95.38	567.17	-379.84	-94.9876	565.94	-377.7671	-0.39	1.22	-2.07	2.44
6	-91.71	508.11	-510.89	-93.1319	507.47	-512.0859	1.41	0.63	1.19	1.95
7	-91.66	415.48	-533.45	-91.6625	414.95	-532.9442	-0.004	0.52	-0.51	0.73
8	-87.54	307.73	-559.55	-86.5410	308.00	-559.3606	-1.00	-0.26	-0.19	1.06
9	-23.54	309.70	-557.61	-23.4992	310.43	-558.1239	-0.04	-0.72	0.51	0.89
10	95.05	309.43	-555.85	93.3299	308.71	-554.7539	1.72	0.71	-1.10	2.17
11	28.91	515.29	-394.32	28.7150	518.06	-395.1181	0.19	-2.76	0.79	2.88
12	101.52	526.58	-375.68	102.4614	526.68	-375.1854	-0.93	-0.10	-0.49	1.06
13	152.20	494.56	-426.64	152.2581	493.68	-425.6906	-0.05	0.88	-0.95	1.30
14	102.81	457.32	-486.45	104.0633	457.59	-487.2740	-1.24	-0.27	0.81	1.51
15	17.05	466.62	-472.00	17.4830	466.88	-473.4919	-0.49	-0.25	1.48	1.56
Error promedio absoluto (mm):							0.628	0.653	0.834	1.418

Tabla 3.9. Comparación de coordenadas tridimensionales medidas contra calculadas.

La Tabla anterior muestra que la distancia de los puntos estimados respecto a los puntos medidos es muy pequeña (para el tipo de aplicación requerida), ya que ninguno de los puntos muestra estimados supera los 3 mm de error.

De la Tabla 3.9 se puede obtener el error máximo, el error mínimo y el error promedio por eje expresados en la Tabla 3.10.

Criterio	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Error máximo absoluto por eje:	1.7282	2.7676	2.0732
Error mínimo absoluto por eje:	0.0044	0.1013	0.4104
Error promedio por eje:	0.6287	0.6531	0.8349

Tabla 3.10. Resultados del error del sistema de visión.

La Figura 3.13 muestra de manera gráfica los puntos medidos y los puntos estimados referidos al sistema coordenado en el efector final de robot manipulador en la misma configuración del robot en la que se realizó la estimación de parámetros.

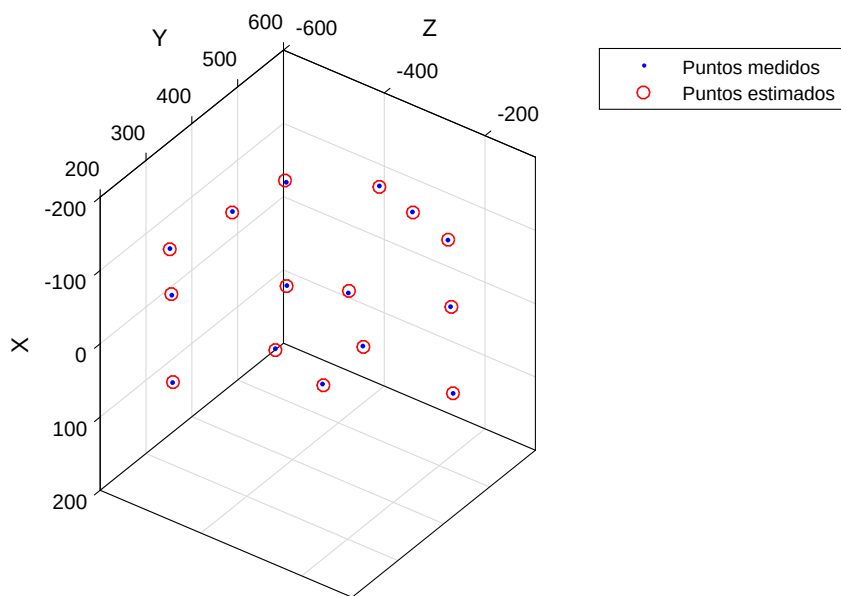


Figura 3.13. Gráfica de puntos medidos contra estimados.

En la Figura anterior se observa un error pequeño entre los puntos estimados y los puntos medidos. Debido a que esta estimación es realizada respecto al efector final de robot, se puede decir que esta prueba es válida para cualquier configuración de juntas del robot.

En la siguiente subsección se muestra la estimación de puntos objetivo dentro del espacio de trabajo del robot.

3.5.3. Estimación de la posición tridimensional de puntos objetivo

En la prueba de estimación de puntos objetivo se colocaron dos esferas rojas frente al robot, de tal manera que las cámaras no puedan detectarlas al mismo tiempo (Figura 3.14). Esto con el fin de demostrar que el sistema de visión funciona incluso cuando el robot cambia su configuración de juntas.

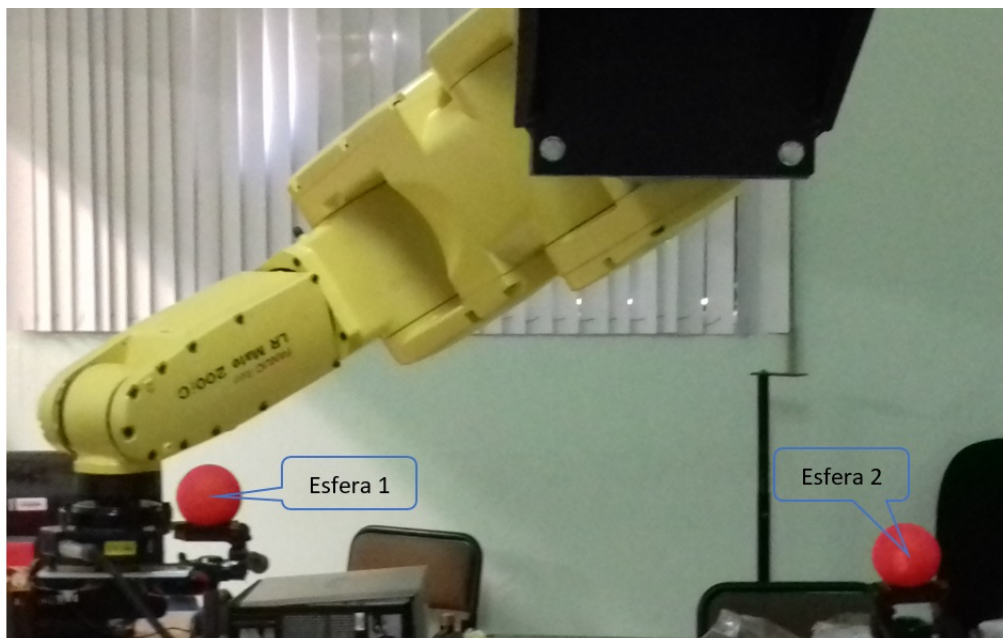


Figura 3.14. Puntos objetivos observados por las cámaras.

Para realizar la estimación de la posición tridimensional de ambas esferas respecto a la base del robot es necesario conocer dos cosas: las coordenadas x_c , y_c del centro geométrico del objeto en ambas cámaras y la configuración de las juntas del robot al momento de la detección del centro geométrico del objetivo. Para obtener estos datos, el robot es colocado de manera que ambas cámaras puedan observar al menos a una esfera. En las figuras 3.15 y 3.16 se muestra lo que observan las cámaras al momento de la detección de las esferas.

Una vez colocado el robot de tal manera que las cámaras puedan observar a las esferas objetivo (una a la vez), se hace el tratamiento de imágenes necesario y se obtiene su centro geométrico en cada cámara. La Tabla 3.11 muestra los datos requeridos para obtener la posición de la esfera 1, mientras que la Tabla 3.12 muestra los datos para la esfera 2.



(a) Cámara L (izquierda).

(b) Cámara R (derecha).

Figura 3.15. Ubicación del centro geométrico de la esfera 1 en ambas cámaras para la primera configuración del robot.

	Configuración del manipulador (Grados)		Posición del centro geométrico (cámara L)		Posición del centro geométrico (cámara R)	
			x_c (Píxeles)	y_c (Píxeles)	x_c (Píxeles)	y_c (Píxeles)
Esfera 1	J1	57.5350	-95.2416	-66.9784	-78.0063	-111.792
	J2	39.4140				
	J3	-49.1980				
	J4	-64.2860				
	J5	69.4660				
	J6	-96.0670				

Tabla 3.11. Valores necesarios para la estimación de la posición de un objetivo respecto a la base del robot.

	Configuración del manipulador (Grados)		Posición del centro geométrico (cámara L)		Posición del centro geométrico (cámara R)	
			x_c (Píxeles)	y_c (Píxeles)	x_c (Píxeles)	y_c (Píxeles)
Esfera 2	J1	-48.5570	50.6703	-240.39	102.035	-281.92
	J2	24.6680				
	J3	-58.6030				
	J4	52.9970				
	J5	69.8280				
	J6	-156.7200				

Tabla 3.12. Valores necesarios para la estimación de la posición de un objetivo respecto a la base del robot.

Analizando los datos obtenidos de las imágenes se obtienen las coordenadas del centro geométrico de las esferas respecto al sistema coordenado en el efector final del robot. Dichas coordenadas se muestran en la Tabla 3.13.

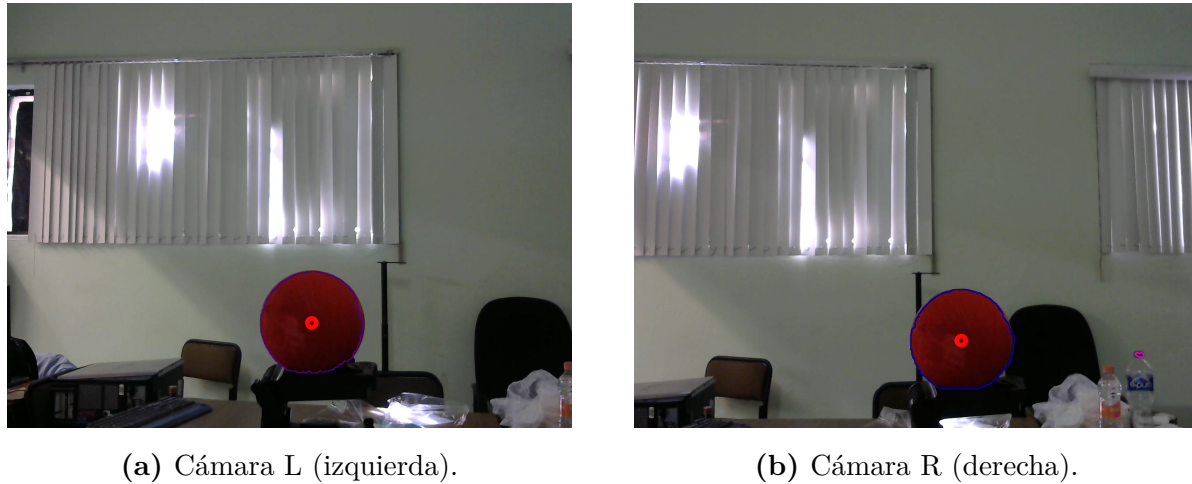


Figura 3.16. Ubicación del centro geométrico de la esfera 2 en ambas cámaras para la segunda configuración del robot.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Esfera 1	57.964	423.844	-406.543
Esfera 2	116.246	419.245	-322.730

Tabla 3.13. Coordenadas 3D de puntos objetivos respecto al efector final.

Usando las configuraciones del robot para la detección del centro geométrico de cada esfera es posible referir las coordenadas anteriores a la base del robot industrial. Las coordenadas de las esferas respecto a la base del robot se muestran en la Tabla 3.14.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Esfera 1	423.194	465.446	625.599
Esfera 2	481.489	-364.969	565.955

Tabla 3.14. Coordenadas tridimensionales de puntos objetivos respecto a la base del robot.

La configuración del robot de 6 grados de libertad se evalúa utilizando el modelo cinemático inverso del robot, disponible en el controlador del mismo, de manera que se asegure el posicionamiento del efecto final, manteniendo una orientación fija de la herramienta del robot respecto al sistema coordenado unido a la base del mismo.

3.5.4. Posicionamiento del robot respecto a puntos objetivo

El diagrama de bloques siguiente ejemplifica el proceso que se sigue para una tarea de posicionamiento del robot manipulador.

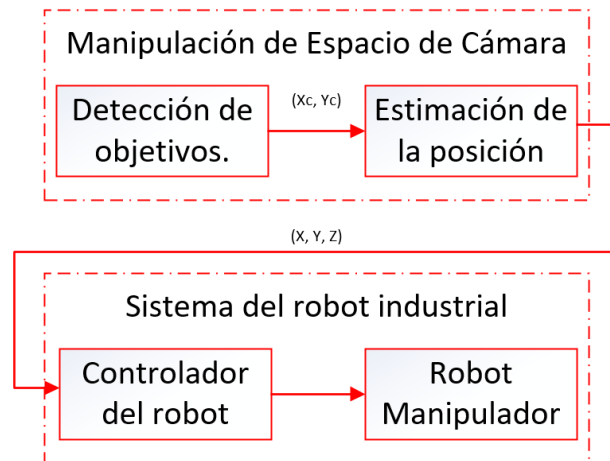


Figura 3.17. Diagrama de bloques del sistema de control por visión.

Para verificar las coordenadas estimadas de los puntos objetivo respecto a la base del robot, se hace uso del mismo robot manipulador. En este caso, como no se puede posicionar al efector final del robot en el centro geométrico del objetivo, a la coordenada z se establece una separación de -300 milímetros para la primera esfera y -200 milímetros para la segunda, mientras que a las coordenadas x y y se les da el valor proveniente de la estimación. En la Figura 3.18 se muestran las coordenadas dadas del efector final respecto a la base del robot.

World		Tool:10	
Configuration: F U T, 0, 0, 0		Configuration: F U T, 0, 0, -1	
x: 423.024	y: 465.005	z: 325.046	
w: -90.002	p: 42.133	r: -90.004	

World		Tool:10	
Configuration: F U T, 0, 0, -1		Configuration: F U T, 0, 0, -1	
x: 481.879	y: -364.503	z: 365.951	
w: -90.005	p: 42.137	r: -90.002	

(a) Esfera 1.

(b) Esfera 2.

Figura 3.18. Posición cercana al objetivo dada al robot.

Se mide la distancia que existe entre el efector final y cada una de las esferas a lo largo del eje z en la base del robot. Se verifican, en la Figura 3.19, las separaciones dadas al efector final.

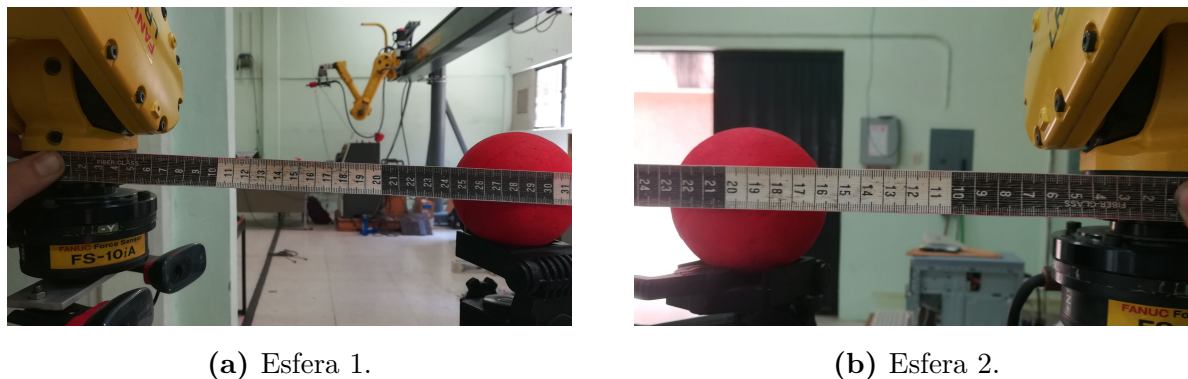


Figura 3.19. Medición de la separación entre el efector final del robot y las esferas.

Con esta prueba se comprueba que con la metodología de LCM-CSM es posible desarrollar sistemas de visión en configuración cámara en mano.

3.6. Conclusiones del capítulo 3

En este capítulo se propone una extensión de la metodología CSM lineal, la cual tiene como finalidad el desarrollo de sistemas de visión con una configuración de cámara en mano. Una de las ventajas más importantes de esta variante es la facilidad de ubicar objetivos que puedan estar ocultos en una cierta posición de las cámaras. Esto debido a que, a diferencia de los sistemas con cámara fija, los sistemas cámara en mano pueden obtener distintas perspectivas de un mismo espacio de trabajo.

Los resultados muestran que la metodología de manipulación en espacio de cámara para sistemas en configuración cámara en mano (EIH-CSM) es una opción factible para el desarrollo de un sistema de visión.

A pesar de que el error en el sistema de visión cámara en mano es grande comparado con el de diversos sistemas de visión con cámara fija, sigue siendo un error aceptable para la tarea de recolección de tomates que muchas veces llegan a tener tamaños entre 50 mm y 80 mm de diámetro.

Algunas de las diferencias a considerar que hay entre este trabajo y el mencionado en [42] son el modelo de manipulación en espacio de cámara, siendo el modelo lineal el utilizado en el presente proyecto, el tipo de robot con restricciones holonómicas y que en este caso no se realiza una actualización de parámetros de visión.

Diseño de herramental para cosecha

4.1. El problema del etileno en hortalizas

Los frutos y verduras y en general los productos hortifrutícolas, son cosechados cuando alcanzan el estado de desarrollo apropiado para el mercado y el consumidor final. La recolección genera estrés, es decir una tensión en el producto que desencadena incrementos en la respiración, maduración acelerada y muerte del producto de manera rápida [43].

En las plantas el etileno (C_2H_4) desempeña un papel importante en el proceso de maduración de frutos climatéricos. Parámetros tales como el reblandecimiento de la pulpa, el cambio de color y la producción de volátiles dependen en gran medida de la producción de C_2H_4 .

El etileno tiene, entre otras, la característica de aumentar la actividad metabólica de los frutos, acelerando su maduración. El etileno, aun en bajas concentraciones, tiene efectos marcados sobre los frutos, especialmente en los climatéricos, de forma tal que aumenta su tasa respiratoria y ayuda a la degradación de la clorofila.

Los efectos negativos o positivos del etileno dependen del producto; en hortalizas de hoja puede ser nocivo, puesto que si se degrada la clorofila toman una tonalidad amarillenta que no es adecuada. En flores acelera la caída de los pétalos y en algunas frutas ayuda a desarrollar el color característico de las mismas. Así mismo, existen diferentes niveles en la producción de etileno como se observa en la Tabla 4.1.

Clase	Rango a 20° (μL de $\text{C}_2\text{H}_4/\text{Kg}^*\text{hr}$)	Especie
Muy bajo	Menor a 0.1	Alcachofa, uva, espárrago, coliflor, cereza, fresa, granada, cítricos, raíces, papa, la mayoría de flores de corte, ají, cocona
Bajo	0.1 - 1.0	Mora, arándano, melón, cocombro, oliva, pimienta, pina, tamarindo, papa criolla
Moderado	1.0 - 10.0	Banano, guayaba, higo, melón Honeydew, mango, lychee, plátano, tomate, copoazu
Alto	10.0 - 100.0	Manzana, albaricoque, melón cantaloupe, feijoa, kiwi, nectarín, papaya, durazno, pera, ciruela, araza, uchuva
Muy Alto	más de 100.0	Chirimoya, maracuyá, zapote, gulupa, cholupa

Tabla 4.1. Clasificación de especies hortícolas de acuerdo a la producción de etileno (Tomado de [43]).

Se observa que el tomate es una hortaliza que libera etileno en dosis moderadas. El tomate, al tener esta característica, debe tener un trato más delicado a la hora de la cosecha. Si éste llega a presentar algún daño, la producción de etileno se eleva provocando la maduración del tomate dañado y de otros alrededor al momento de empaque y transporte. Por esto es importante el diseño de un herramental para cosecha que evite daños significativos al tomate durante la etapa de cosecha.

Para el diseño de dicha herramienta se deben obtener rangos de esfuerzo y deformación dentro de los cuales el tomate no presente daño que propicie la liberación de etileno (y por lo tanto la maduración prematura del producto a cosechar).

La prueba de compresión de tomate descrita en la siguiente sección se realiza para definir los rangos de esfuerzo y deformación donde el tomate presenta daño recuperable y tipos de daño no recuperable. En esta prueba se hace uso de un sensor de fuerza colocado en el extremo del mismo robot manipulador.

4.2. Datos generales de la prueba de compresión de tomates

La prueba de compresión de tomates consiste en utilizar el robot Fanuc LR mate 200iC para realizarla y el sensor de fuerza Fanuc FS-10iA que se muestra en la Figura 4.1 para medir las cargas ejercidas durante una prueba de compresión del tomate.



Figura 4.1. Sensor de fuerza Fanuc FS-10iA.

A este sensor de fuerza se le coloca una barra de aluminio de 147 mm de longitud con un disco de 1.375 pulgadas de diámetro en el extremo libre.

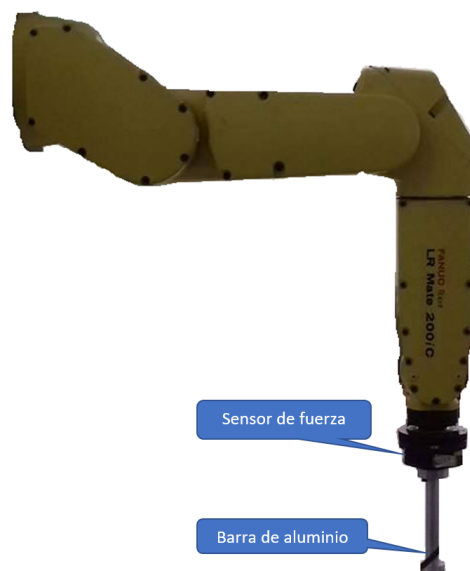


Figura 4.2. Sensor de fuerza Fanuc FS-10iA montado en el extremo del robot.

Se colocan tomates de la misma especie (Saladette) de tamaño relativamente grande debajo del efector final del robot y se mide la fuerza mientras el sensor se desplaza comprimiendo al producto sobre la mesa, en una dirección coincidente con uno de los ejes coordenados en la base del robot, en este caso el eje x.



Figura 4.3. Ubicación del tomate debajo del efector final.

En la Tabla 4.2 se muestra el tamaño y peso de los tomates (los tomates 4 y 6 fueron retirados de los resultados debido a su tamaño reducido).

Tomate	Peso (grs)	Diámetro máximo (mm)	Altura (mm)
1	112	53.67	84.88
2	110	55.47	79.57
3	105	51.77	75.27
5	160	60.46	75.32
7	140	58.07	72.70
8	150	59.55	79.25

Tabla 4.2. Peso y Tamaño de los tomates sometidos a compresión.

Los tomates se dividen en 2 grupos, los tomates 1, 2 y 3 fueron sometidos a una prueba de destrucción y los tomates 5, 7 y 8 fueron sometidos a diferentes niveles de fuerza.

Los datos arrojados de la prueba son el desplazamiento del robot y la fuerza aplicada sobre el tomate, por lo que es necesario realizar un análisis posterior a la prueba para obtener los datos en términos de esfuerzo y deformación. Con la posición de la mesa y la posición del efector final en el momento en que el sensor empieza a detectar fuerza, se puede obtener la deformación unitaria del tomate. El procedimiento se muestra a continuación.

Se parte de la definición de deformación unitaria en una sola dimensión descrita en [44]. Se realiza la suposición de que l_0 es el diámetro inicial del tomate y l es el diámetro deformado.

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4.1)$$

Con base en la Figura 4.4 se propone X_0 como la posición del efector al momento de detectar una fuerza en el sensor y X_{Desp} como la posición del efector después del contacto con el tomate (ambas respecto a la base del robot), y se plantean las ecuaciones 4.2 y 4.3.

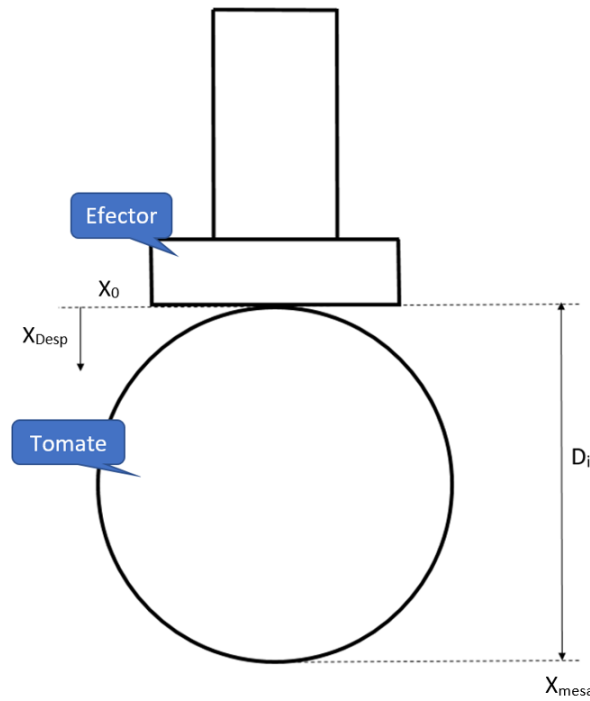


Figura 4.4. Diagrama utilizado para la obtención de la deformación unitaria del tomate.

$$l_0 = D_i = X_{mesa} - X_0 \quad (4.2)$$

$$l = X_{mesa} - X_{Desp} \quad (4.3)$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.2 y 4.3 en 4.1 se llega a la ecuación siguiente.

$$\epsilon = \frac{(X_{mesa} - X_{Desp}) - (X_{mesa} - X_0)}{X_{mesa} - X_0} \quad (4.4)$$

Reduciendo la ecuación 4.4 se tiene la ecuación que se muestra a continuación.

$$\epsilon = \frac{X_0 - X_{Desp}}{X_{mesa} - X_0} \quad (4.5)$$

De esta manera se propone una ecuación para la deformación unitaria del tomate que queda en función únicamente del desplazamiento del tomate.

Para la obtención de esfuerzo en el tomate se hace uso de la ecuación 4.6 descrita en [45].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.6)$$

Donde F es la fuerza medida por el sensor, A es el área del extremo del efector final y σ es el esfuerzo promedio producido en la superficie del tomate. Así se pueden obtener curvas esfuerzo promedio contra deformación de los tomates sometidos a la prueba de compresión.

4.3. Prueba destructiva

La prueba de destrucción de tomates se realiza para encontrar un tipo de curva esfuerzo-deformación que describa el comportamiento de un tomate ante una carga.

El punto de inicio del efector final está dado por las coordenadas $X = 875$ mm, $Y = 0$ mm, $Z = 0$ mm respecto a la base del robot FANUC (Figura 4.5a). Las coordenadas finales son tomadas en el momento en el que la cáscara del tomate cede como se ve en la Figura 4.5b. La superficie de la mesa que se ve en la Figura 4.5 se encuentra a 945 mm de la base del robot a lo largo del eje X.



(a) Posición inicial de la prueba de destrucción. (b) Posición final de la prueba de destrucción.

Figura 4.5. Posición inicial y final de la prueba de destrucción de tomates

Una vez obtenidas las fuerzas medidas en el sensor de fuerza por cada milímetro de desplazamiento del efector final, se obtiene la siguiente gráfica.

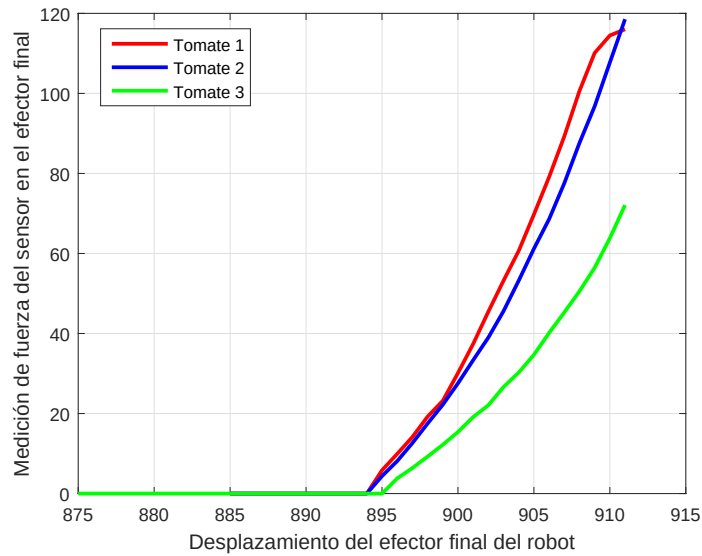


Figura 4.6. Gráfica de fuerza medida por el sensor contra desplazamiento del efector final.

Se puede observar en la Figura 4.6 que el rango de fuerza en el que el tomate colapsa es muy amplio, pudiendo ser desde 70 a 120 N. El esfuerzo promedio y la deformación en el tomate se muestra en la Figura 4.7.

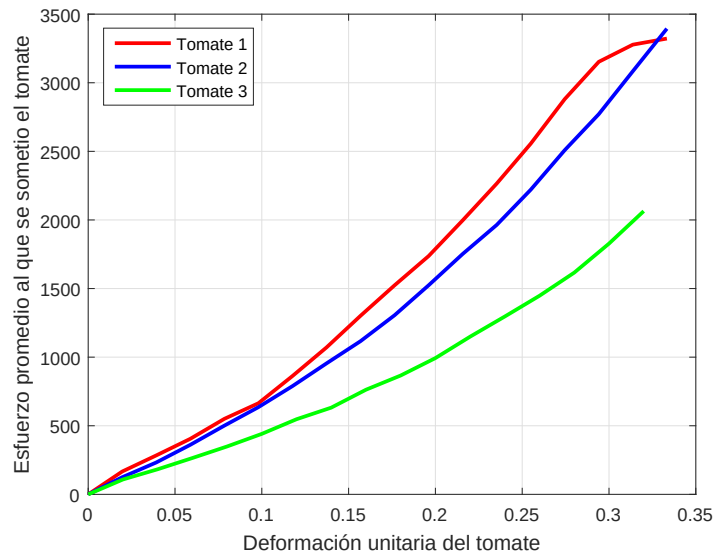


Figura 4.7. Gráfica del esfuerzo promedio contra deformación de los tomates 1, 2 y 3.

De esta prueba de destrucción se sabe que el tomate presenta varias etapas de deformación hasta el punto de la destrucción. La primera etapa sucede al momento de ejercer fuerza sobre el tomate, éste comienza a deformarse, pero debido a que la fuerza es pequeña, no se presenta daño significativo en el tomate. En la segunda etapa se presentan daños en el tomate de manera superficial, pero no se sabe con certeza si el tomate queda deformado permanentemente. Durante la siguiente etapa comienzan a presentarse estrías en la cascara del tomate debido a la intensidad de la fuerza a la que está sometido el tomate. Al final, durante la etapa de destrucción, las estrías presentes en el tomate se hacen más profundas hasta que el interior del tomate sale disparado al ambiente por la presión ejercida por el efector final del robot.

En la Figura 4.8 se muestran los daños causados a los tomates en cada etapa de deformación.

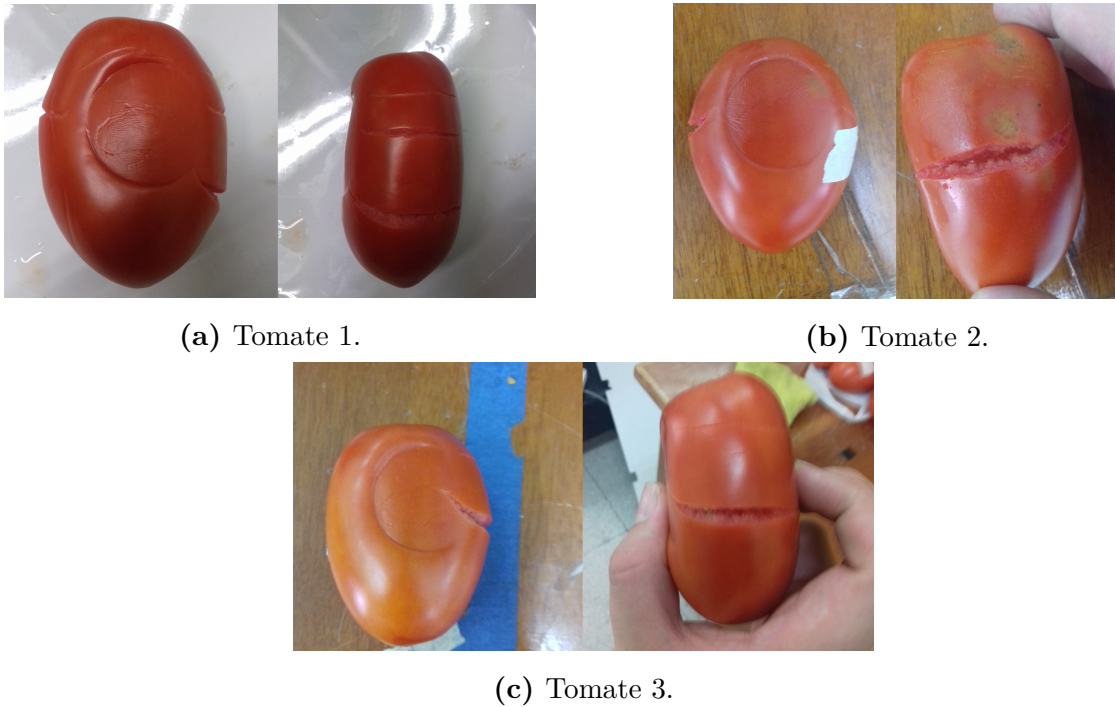
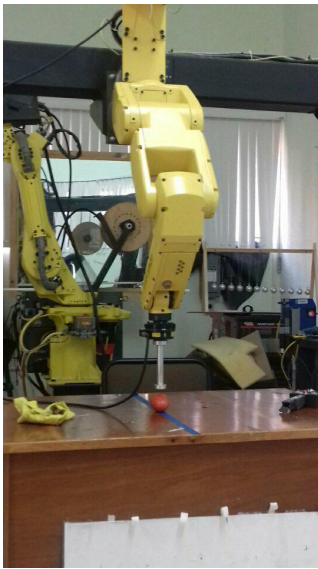


Figura 4.8. Tomates 1, 2 y 3 posterior de la prueba destructiva.

Para identificar los rangos de daño al tomate se somete el tomate a diferentes niveles de carga.

4.4. Comportamiento de tomates a diferentes niveles de carga aplicada

El aplicar diferentes niveles de carga a tomates se hace con el fin de encontrar un intervalo de fuerza donde el tomate no sufra deformación permanente.



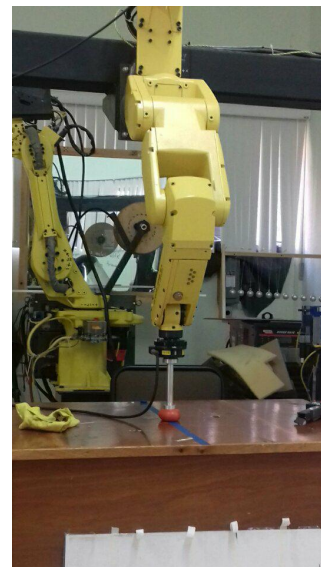
(a) 880 mm.



(b) 890 mm.



(c) 895 mm.

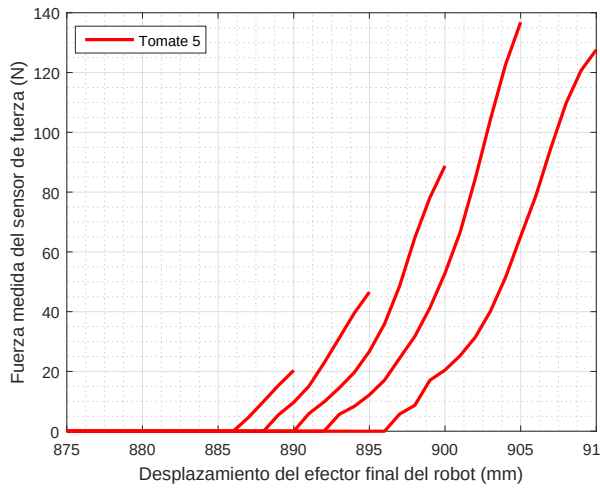


(d) 900 mm.

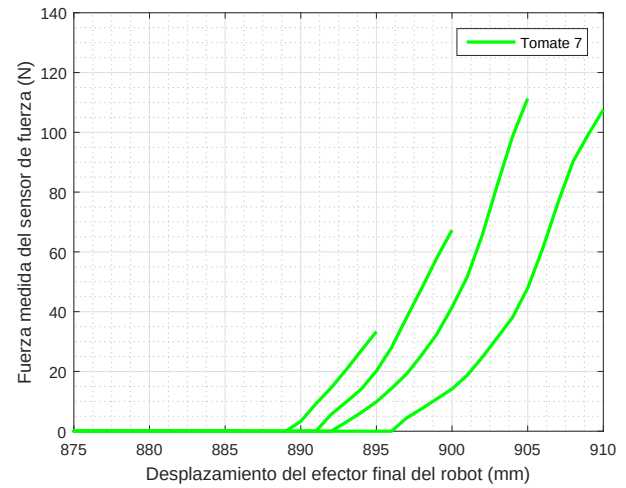
Figura 4.9. Prueba de aplicación de diferentes niveles de carga.

La prueba consiste en dar avances del efector final de 5 mm a partir del avance anterior; es decir, avanza 5 mm, 10 mm 15 mm y así sucesivamente hasta que el tomate cede debido a la intensidad de fuerza aplicada. Entre cada avance se hace un retroceso del efector final a la posición inicial de la prueba (en este caso el punto inicial es $X = 875$ mm, $Y = 0$, $Z = 0$). En la Figura 4.9 se muestran imágenes de la prueba y los avances dados al robot.

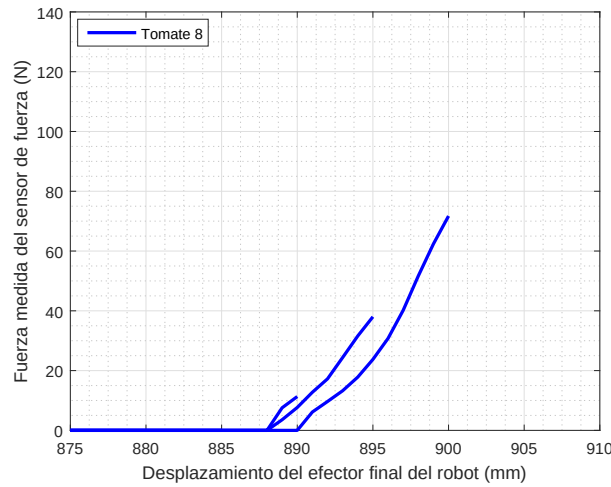
Los tomates 5, 7 y 8 fueron sometidos a esta prueba, los datos arrojados son nuevamente el desplazamiento del robot y la fuerza ejercida sobre el tomate; las gráficas de esta prueba se muestran en la Figura 4.10.



(a) Tomate 5.



(b) Tomate 7.



(c) Tomate 8.

Figura 4.10. Curvas de fuerza del sensor contra desplazamiento del robot.

En las gráficas anteriores se puede observar que el tomate presenta una deformación permanente después de aplicada una fuerza. Esto explica porqué el robot debe realizar avances mayores para aplicar una mínima fuerza al tomate.

En las figuras 4.10a y 4.10b se observa que los tomates no presentan recuperación alguna a pesar de que la fuerza aplicada es pequeña. En la gráfica de la Figura 4.10c se nota que el primer desplazamiento ejerce una fuerza alrededor de 11 Newtons en el tomate, por lo que este presenta una recuperación casi perfecta haciendo excepción el hecho de que al momento de realizar el segundo desplazamiento, la curva de desplazamiento contra fuerza no se comporta de la misma manera, asumiendo así que se presenta un daño en el tomate.

En términos de esfuerzo y deformación (Figura 4.11), es seguro que la fuerza necesaria para no dañar el tomate se encuentra por debajo de los 400 Pa, esto con el fin de no dañar el tomate, que este no madure más rápido de lo normal y que no madure a otros tomates cercanos por el etileno liberado al momento de ser empacados para su transporte.

En esta prueba se pueden definir de manera más clara las etapas por las que pasa el tomate al momento de aplicar una fuerza.

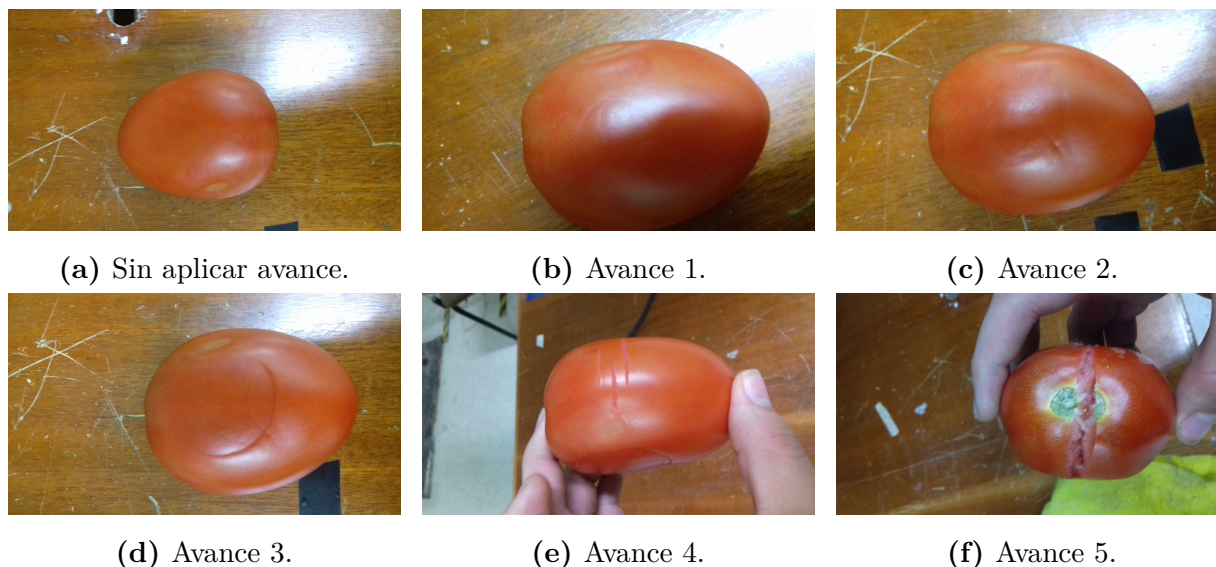
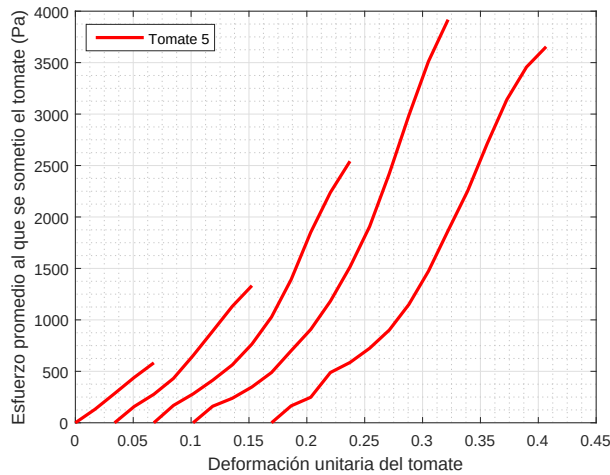
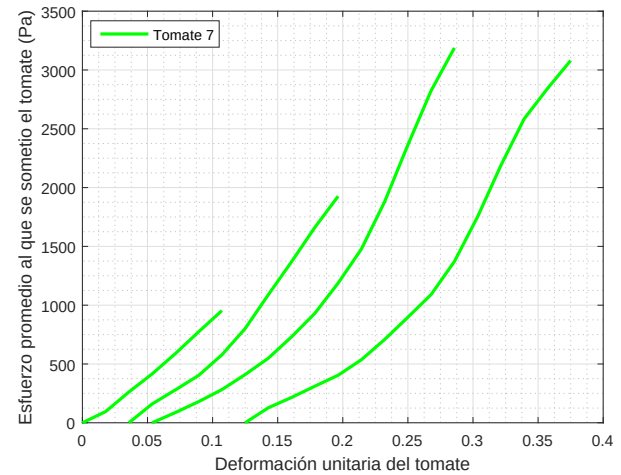


Figura 4.12. Tomate 5 deformado.

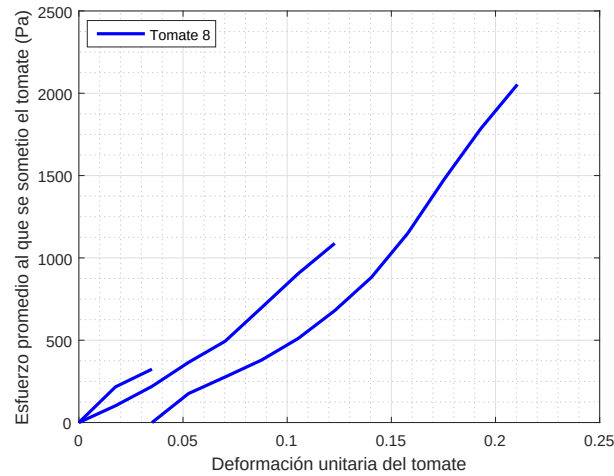
Retomando las diferentes etapas de deformación del tomate, se observa en las figuras 4.12b y 4.12c que el tomate presenta daño en su superficie y se sabe ahora que el tomate se



(a) Tomate 5.



(b) Tomate 7.



(c) Tomate 8.

Figura 4.11. Tomates 5, 7 y 8 posterior de la prueba destructiva.

deforma permanentemente con esfuerzos mayores a 500 Pa.

En las figuras 4.12d y 4.12e se puede ver que al ir aumentando la fuerza sobre el tomate, éste comienza a presentar cortes por el efector final y grietas a los costados. Aunque ya no es necesario un análisis del tomate llegando a estos puntos de deformación, igual se realiza para poder plantear rangos de esfuerzo que puede soportar un tomate.

En la Figura 4.12f se observa la destrucción del tomate. En este caso en particular el tomate cedió de la parte donde se une con el cáliz y no de los costados como todas las pruebas

anteriores (y posteriores), posiblemente un resultado del manejo del tomate en esta prueba.

De igual manera que el tomate 5, el tomate 7 presenta daños similares en intervalos de esfuerzo y deformación similares a los del tomate 5. En las figuras 4.13b y 4.13c se aprecian marcas del extremo del robot en la superficie del tomate y en la figuras 4.13d y 4.13e se observa el agrietamiento y destrucción del tomate respectivamente.

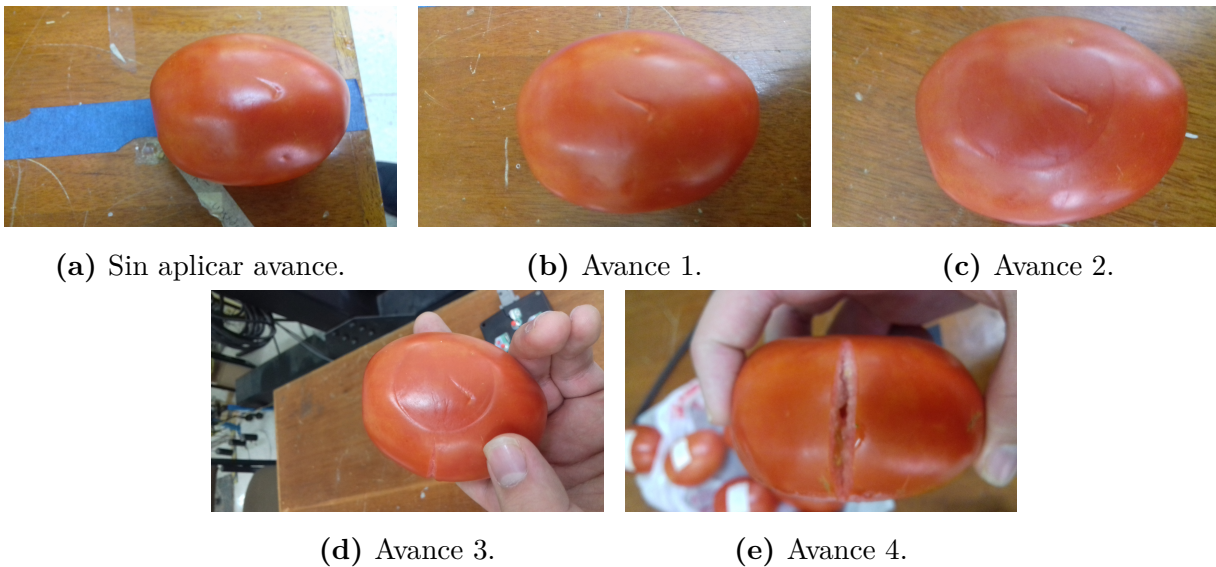
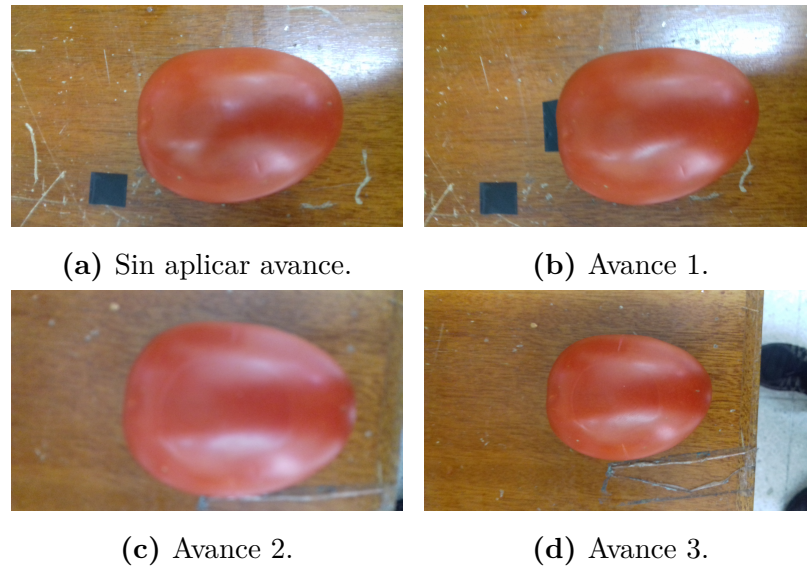


Figura 4.13. Tomate 7 deformado.

Los cortes hechos por el efector final se presentan después de una carga cercana a los 2000 Pa mientras que el agrietamiento se considera alrededor de los 2500 Pa. La destrucción del tomate se presenta llevando el esfuerzo ejercido en éste más allá de los 3000 Pa.

El tomate 8 ya no se lleva a la destrucción pero se somete a cargas en las cuales se busca un rango de fuerza donde el tomate no sufra ningún tipo de daño.

La Figura 4.14a muestra el tomate antes de someterlo a la prueba y la Figura 4.14b muestra el mismo tomate después del primer avance; no hay diferencia visible en la superficie del tomate.

**Figura 4.14.** Tomate 8 deformado.

De esta manera se pueden plantear rangos de esfuerzo dentro de los cuales se puede definir un daño hecho al tomate, estos rangos se definen en la Tabla 4.3 además de una breve descripción.

Tipo de daño	Rango de esfuerzo en el que se presenta el daño	Descripción
Daño recuperable	$\sigma \leq 380 \text{ Pa}$	Daño no visible en la superficie del tomate, presenta recuperación casi perfecta.
Daño no recuperable	$380 \text{ Pa} < \sigma \leq 2000 \text{ Pa}$	Daño visible en la superficie del tomate. Pueden presentarse cortadas en la superficie por el efector final.
Estriado	$2000 \text{ Pa} \leq \sigma < 2500 \text{ Pa}$	Comienzan a presentarse estrías sobre la superficie. Es posible que en esta etapa se presente la destrucción.
Destrucción	$2500 \text{ Pa} < \sigma$	Las estrías se hacen más grandes en la superficie del tomate, hasta el punto de la destrucción del tomate.

Tabla 4.3. Tipos de daño al tomate y rangos de esfuerzo donde se presentan.

Los estudios realizados en [28] y [46], coinciden en que la mayor deformación que soporta la piel de un tomate sin sufrir daño es de alrededor de 3 mm. También es importante tomar en cuenta el tiempo en que el tomate se relaja al aplicarle un esfuerzo, ya que al extender el tiempo este comienza a deformarse permanentemente reduciendo su calidad y aumentando la liberación de etileno.

La Figura 4.15 muestra el comportamiento de un tomate sometido a una deformación constante. La primera sección de la gráfica muestra la fuerza aplicada al tomate a lo largo de un desplazamiento de 3 mm, la segunda parte en cambio muestra el mismo valor de la fuerza, pero ahora respecto al tiempo de relajación del tomate.

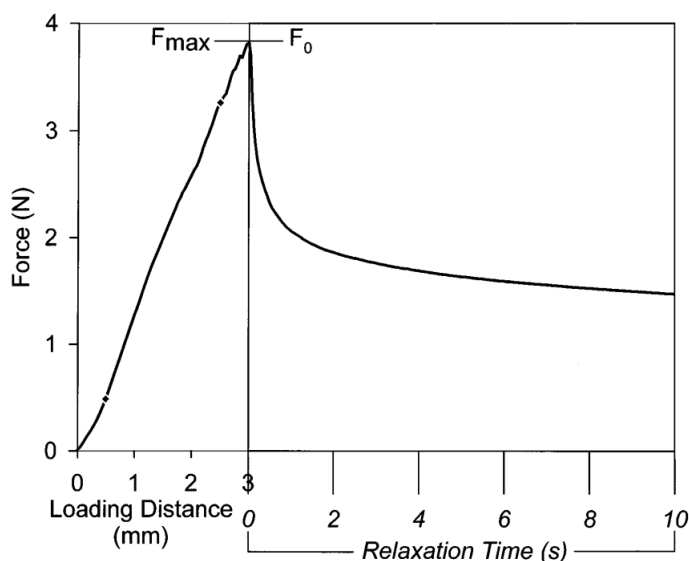


Figura 4.15. Curva típica de relajación de un tomate en estado torneado usando un punzón de 4 mm (Tomado de [28]).

El comportamiento de esta curva varía dependiendo del estado en que se encuentre el tomate y los días que pasan después de la fecha en que se cortó el tomate.

Es importante tomar en cuenta que el tomate tiende a relajarse inmediatamente después de que se le aplica una fuerza, por lo que la tarea de recolección de tomates debe de realizarse lo más rápido posible por un robot manipulador.

4.5. Propuesta del herramental para la recolección de tomates

Debido a que los tomates son hortalizas muy frágiles, se plantea un efector final de 4 dedos, cuyo propósito no es sujetar al tomate sino encerrarlo entre los dedos formando una jaula.

Para el diseño del efector final del robot industrial se pensó en un herramental capaz de sostener el tomate sin presionarlo. Se decidió realizar un mecanismo que rodee el tomate y que evite que el tomate caiga al suelo sin importar la orientación del efector final del robot.

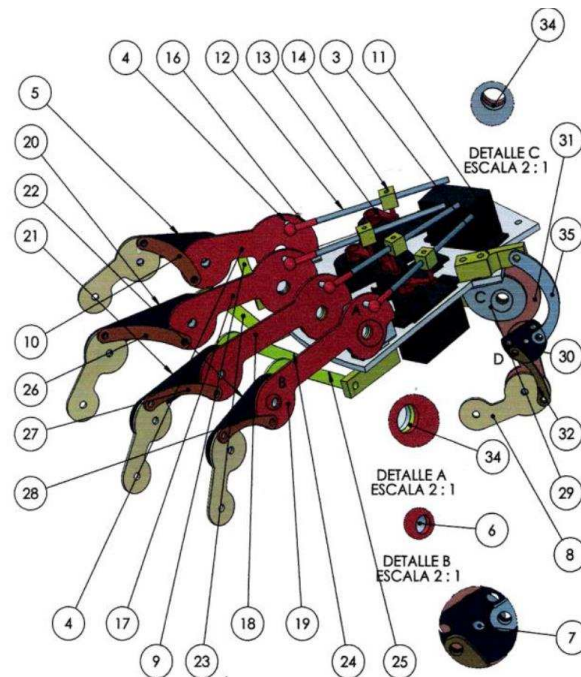
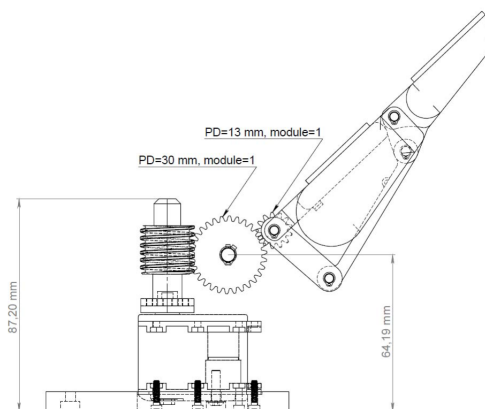


Figura 4.16. Mano robótica base para el diseño del herramental (Tomado de [47]).

El mecanismo de sujeción está basado en el movimiento de un pulgar mecánico descrito en [47], y en el sistema de accionamiento descrito en [48] donde se observa que por medio de un tornillo sin fin se accionan los tres mecanismos de sujeción del herramental.



(a) Modelo tridimensional.



(b) Modelo bidimensional.

Figura 4.17. Dedo y tren de engranes en el que se basó el diseño del herramental recolector de tomates (Tomado de [48]).

El sujetador descrito en [48] utiliza dos grados de libertad en cada dedo para realizar la acción de sujeción de objetos, por lo cual solo se toma la idea del tren de engranes para el diseño del efector final, ya que es necesario usar un número mínimo de actuadores para realizar la tarea de recolección.

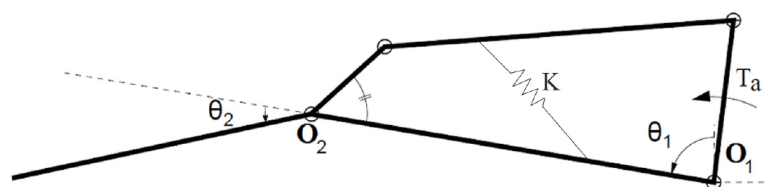


Figura 4.18. Diagrama cinemático de dos grados de libertad del dedo usado en [48].

Es necesario que el sujetador colector de tomates realice la acción de sujeción con un solo grado de libertad, por lo que se obtuvo un diagrama cinemático auxiliar del mecanismo del pulgar de la Figura 4.19.

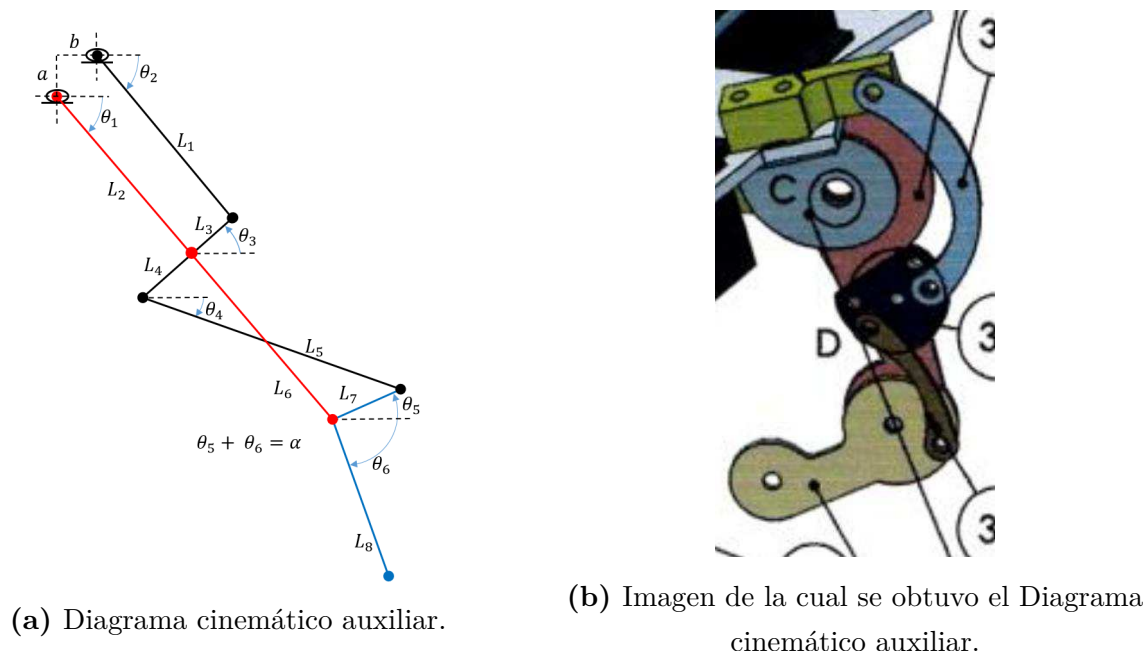


Figura 4.19. Diagrama cinemático auxiliar del mecanismo del pulgar de la mano mecánica.

Una vez realizado el diagrama cinemático auxiliar, se observa que el mecanismo del pulgar está integrado por seis eslabones y algunos eslabones están constituidos por más de una longitud. En la Tabla 4.4 se muestran las longitudes por la cuales que está constituido cada eslabón que conforma el mecanismo:

Eslabón	Partes que lo componen
1	a, b
2	L_1
3	L_2, L_6
4	L_3, L_4
5	L_5
6	L_7, L_8

Tabla 4.4. Longitudes que componen cada eslabón en el diagrama cinemático auxiliar del pulgar.

La red topológica del mecanismo:

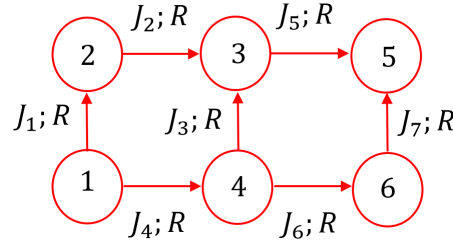


Figura 4.20. Red topológica del mecanismo del pulgar.

Los números encerrados en círculos representan los eslabones por los cuales está conformado el mecanismo, siendo la tierra el eslabón número 1. El índice $J_1;R$ representa que la junta 1 es de tipo rotativa, también $J_2;R$ simboliza que la junta 2 es de tipo rotativa y así sucesivamente hasta la junta $J_7;R$.

Los grados de libertad están dados por la siguiente ecuación:

$$NGL = 3(\text{Número de eslabones} - 1) - 2(\text{Número de juntas con un grado de libertad}) - (\text{Número de juntas con dos grados de libertad}) \quad (4.7)$$

Como las juntas rotativas solo presentan un grado de libertad, el último término de la ecuación se elimina, dejando la ecuación para la obtención de los grados de libertad del mecanismo como sigue:

$$NGL = 3 * (6 - 1) - 2 * (7) = 1 \quad (4.8)$$

Como el mecanismo es de un solo grado de libertad, se selecciona θ_1 como el eslabón de entrada, por lo tanto, esta variable puede ser considerada una constante de entrada al modelo cinemático del mecanismo.

$$\theta_1 = cte \quad (4.9)$$

La solución para θ_3 se expresa como sigue:

$$\theta_3 = 2\arctan\left(\frac{-A_3 \pm \sqrt{A_3^2 + B_3^2 - C_3^2}}{C_3 - B_3}\right) \quad (4.10)$$

Donde:

$$A_3 = 2L_2L_3\sin\theta_1 + 2L_3b \quad (4.11)$$

$$B_3 = 2L_2L_3\cos\theta_1 - 2L_3a \quad (4.12)$$

$$C_3 = L_2^2 - L_1^2 + L_3^2 + a^2 + b^2 + 2L_2(b\sin\theta_1 - a\cos\theta_1) \quad (4.13)$$

Para θ_2 la solución es:

$$\theta_2 = 2\arctan\left(\frac{L_2\sin\theta_1 - L_3\sin\theta_3 + b}{L_1 + L_2\cos\theta_1 + L_3\sin\theta_3 - a}\right) \quad (4.14)$$

La ecuación de θ_4 queda como sigue:

$$\theta_4 = 2\arctan\left(\frac{-A_3 \pm \sqrt{A_3^2 + B_3^2 - C_3^2}}{C_3 - B_3}\right) \quad (4.15)$$

Para la cual se tiene:

$$A_4 = 2L_4L_5\sin\theta_3 + 2L_5L_6\sin\theta_1 \quad (4.16)$$

$$B_4 = 2L_4L_5\cos\theta_3 + 2L_5L_6\cos\theta_1 \quad (4.17)$$

$$C_4 = L_4^2 + L_5^2 + L_6^2 - L_7^2 + 2L_4L_6\cos(\theta_1 + \theta_3) \quad (4.18)$$

La variable θ_5 queda definida por la expresión siguiente:

$$\theta_5 = 2\arctan\left(\frac{-L_4\sin\theta_3 - L_5\sin\theta_4 + L_6\sin\theta_1}{L_7 + L_4\cos\theta_3 + L_5\cos\theta_4 - L_6\cos\theta_1}\right) \quad (4.19)$$

El ángulo que existe entre L_7 y L_8 es constante, para el caso del mecanismo de sujeción se tomó un ángulo $\alpha = 110^\circ$, esto define a la variable θ_6 como se muestra a continuación.

$$\theta_6 = \alpha - \theta_5 \quad (4.20)$$

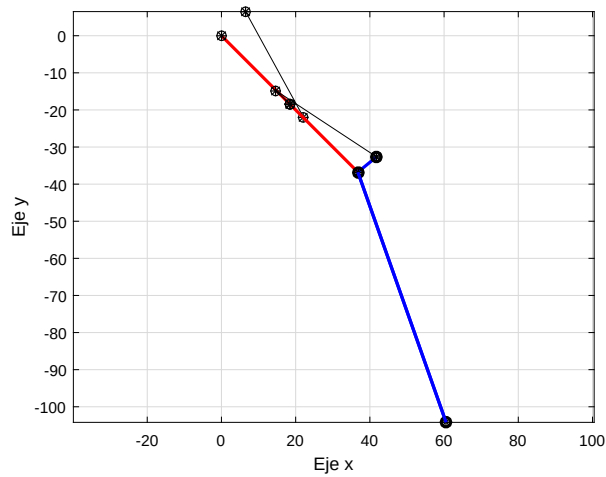
Una vez obtenidas las ecuaciones de posición se procede a simular el mecanismo, las longitudes utilizadas en la simulación fueron definidas según el espacio que ocupa el tomate y se muestran en la Tabla 4.5.

Parámetro de longitud	Magnitud (mm)
a	6.5
b	6.5
L_1	32.5
L_2	26.0
L_3	5.2
L_4	5.2
L_5	35.5
L_6	26.0
L_7	6.5
L_8	71.5

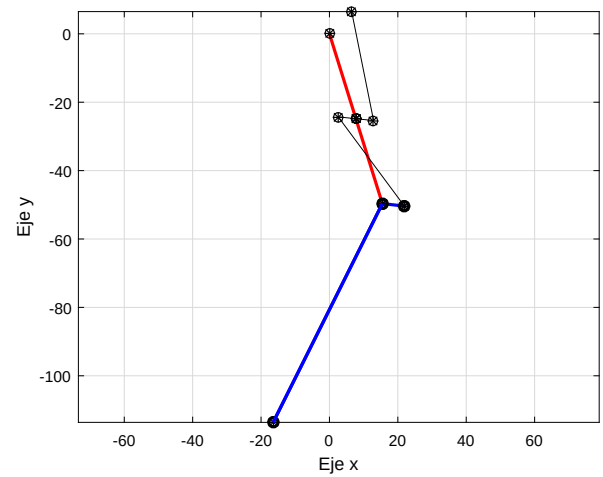
Tabla 4.5. Magnitudes propuestas para las longitudes del mecanismo del pulgar.

El diámetro mayor promedio de los tomates puede ir de 40 mm hasta 70 mm, para la simulación del efector final se tomó un diámetro de tomate de 60 mm.

En la Figura 4.21 se muestran las posiciones del mecanismo en la simulación, con las longitudes seleccionadas.



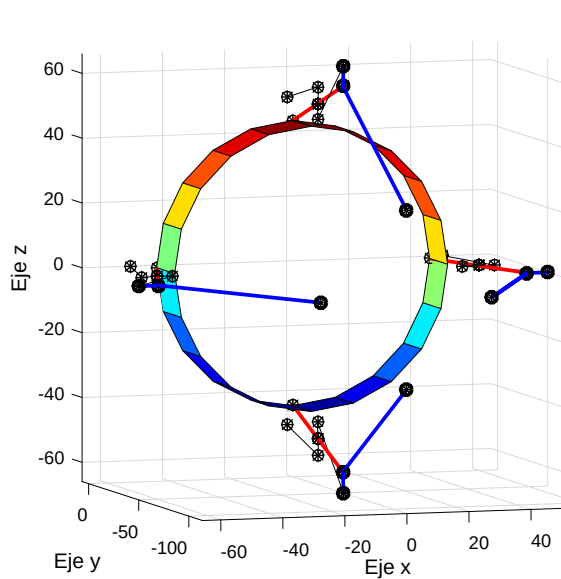
(a) Mecanismo en su posición inicial.



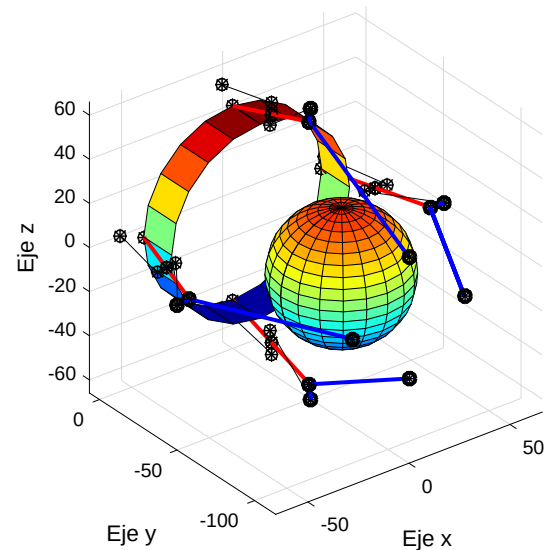
(b) Mecanismo en su posición final.

Figura 4.21. Simulación del mecanismo del dedo.

Para el mecanismo de sujeción se utilizan cuatro mecanismos similares, en 0° , 90° , 180° , 270° como se muestra a continuación. Puesto que se supuso un tomate de 60 mm de diámetro máximo, se coloca una esfera de este tamaño para fines prácticos en la simulación.



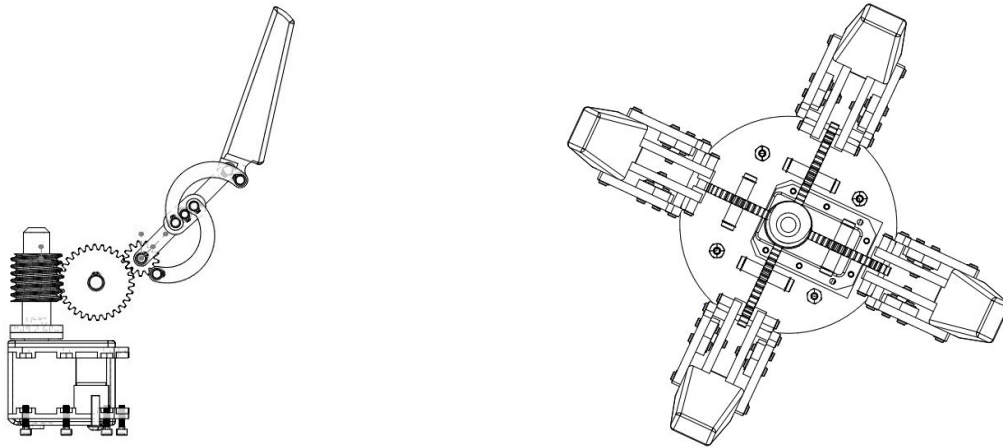
(a) Sujetador en su posición final.



(b) Simulación con una esfera de 60 mm de diámetro.

Figura 4.22. Simulación del sujetador.

En el caso de recolección de tomates se decidió utilizar cuatro engranes corona para así obtener el efecto de jaula requerido para no dañar el tomate. Modificando la base donde se soportan los dedos del mecanismo de sujeción se llegó al siguiente diseño.



(a) Tren de engranes tomado de [48] con el mecanismo basado en el pulgar descrito en [47].

(b) Vista superior del gripper sujetador de tomates.

Figura 4.23. Acoplamiento de los dedos del gripper y el tornillo sin fin.

El modelo del sujetador se muestra en la Figura 4.24.

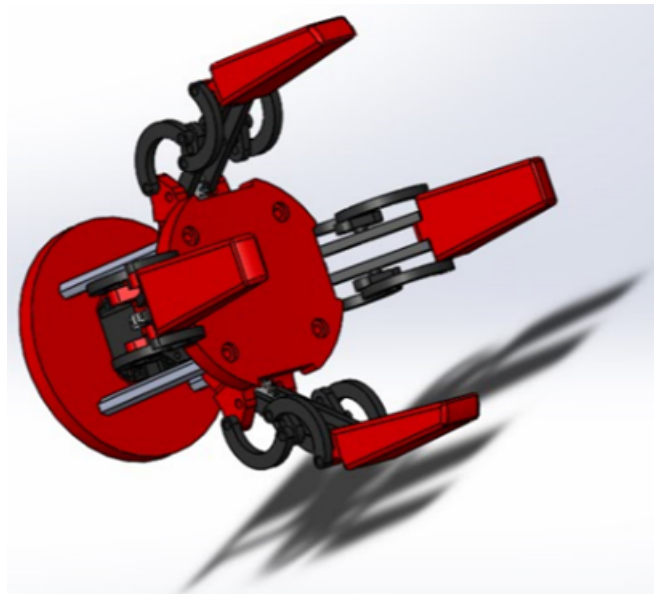
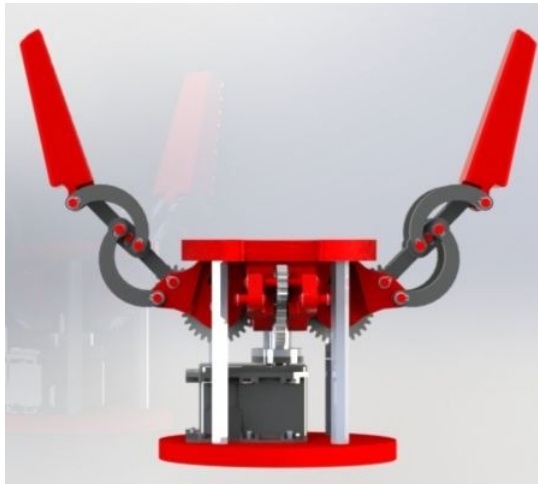


Figura 4.24. Modelo del efector final para la recolección de tomates.

La posición inicial y la posición final del sujetador se muestran en la Figura 4.25.



(a) Gripper abierto.



(b) Gripper cerrado.

Figura 4.25. Simulación del sujetador abierto y cerrado.

4.6. Conclusiones del capítulo 4

Es claro que en los resultados de la prueba de compresión de tomates, estos presentan curvas de esfuerzo-deformación similares y que esto puede ser considerado como una curva característica.

Es muy probable que los tomates no tengan una recuperación perfecta después de aplicarles una fuerza determinada debido a su fragilidad, incluso el simple trato con manos humanas puede dañarlos si este manejo se alarga. Debido a que el tomate es muy frágil, es que se propone el herramienta tipo jaula que evita la aplicación de una fuerza excesiva en el tomate para la cosecha.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrollan las bases de un sistema de visión para la recolección de hortalizas, el cual consiste en el desarrollo de la metodología CSM para sistemas en configuración cámara en mano, un algoritmo de detección de tomares por medio de tratamiento de imágenes y el diseño de un primer prototipo de un herramental para la recolección de tomates.

Una de las ventajas principales del algoritmo de visión es el hecho de obtener un porcentaje de detección de tomates en invernadero relativamente alto utilizando únicamente dos cámaras web comerciales; además, en la mayoría de los casos donde existen varios tomates juntos, es posible detectar por separado cada tomate siempre y cuando estos tomates estén dentro del campo de visión de las cámaras. Este algoritmo representa una mejora significativa respecto a muchos de los sistemas de visión enfocados a la horticultura (existentes en la literatura), que solo realizan una segmentación de imagen en un espacio HSV y por lo tanto la detección de múltiples objetivos juntos no tiene resultados favorables.

El problema de obtener diferentes puntos de vista de un mismo espacio de trabajo, que se presenta con los sistemas de visión aplicados a la horticultura, es atacado por medio de la propuesta de la metodología de manipulación en espacio de cámara para sistemas en configuración cámara en mano, la cual es factible para su uso en futuras aplicaciones no solamente dentro del campo de la horticultura y representa uno de los principales aportes de este trabajo de tesis. Los resultados de la implementación de la metodología EIH-CSM en un espacio

controlado apuntan a que es posible desarrollar sistemas de visión para ambientes similares a invernaderos.

De la prueba de destrucción de tomates se puede concluir que los tomates maduros no son tan firmes como se creía, se magullan permanentemente con niveles de esfuerzo mayor a 380 Pa y esto hace que la respiración y liberación de etileno del tomate sea mucho mayor, madurándolo más rápido de lo normal. Las propuestas a futuro para diseños de herramientas de cosecha de este producto van más enfocadas a jaulas, efectores finales con canastas y tijeras o mecanismos flexibles, estas propuestas son adecuadas para evitar el daño significativo al tomate.

A pesar de que solo se realiza una propuesta del herramental para la cosecha de tomate, ya se tiene un primer prototipo del cual se puede partir para realizar mejoras o incluso un nuevo diseño si es necesario. Este primer prototipo tiene la finalidad de actuar como una jaula rotativa, con el objeto de evitar daños significativos en el tomate al momento de la cosecha.

De este trabajo se tienen las bases de un sistema de visión cámara en mano para la recolección de hortalizas, el cual tiene una precisión adecuada para la detección, ubicación y manipulación de objetivos. Es importante resaltar la simplicidad del algoritmo desarrollado, la facilidad de calibración y el empleo de cámaras disponibles comercialmente a un costo reducido. Estos aspectos son apropiados para una aplicación en condiciones en las que la puesta en operación y mantenimiento del sistema pueden ser demandantes por las condiciones del entorno.

Finalmente, algunos problemas que se pueden presentar al momento de llevar este sistema de visión a un invernadero pueden ser la variación de luz en el entorno del tomate, la identificación de ramas u hojas marchitas en lugar de tomates, el bloqueo del campo de visión de las cámaras por la vegetación, etc. También algo importante a resolver es la trayectoria que debe seguir el robot para lograr detectar la mayor cantidad de tomates, además del acercamiento de la herramienta al producto a cosechar.

Como trabajo derivado de este proyecto de tesis, se presentó un artículo titulado "Sistema de visión cámara en mano aplicable a la automatización en producción agrícola" en el Congreso Nacional de Control Automático CNCA 2018 con sede en San Luis Potosí del

10 al 12 de octubre de 2018 [49].

Trabajo a futuro

Con base en los resultados obtenidos del sistema de visión desarrollado durante el trabajo de tesis, se presentan las siguientes áreas de oportunidad para trabajo a futuro:

- Aplicación de algoritmos de tratamiento de imágenes para aumentar el porcentaje de éxito en la detección de tomates.
- Implementación de sensores y lámparas al sistema de detección de tomates para identificar tomates en ambientes de poca luz.
- Automatizar el proceso de estimación de parámetros de las cámaras involucradas en el sistema de visión.
- Realizar mejoras al herramental para recolección de tomates.
- Implementación del sistema de visión en un entorno de trabajo real o un invernadero semi-automatizable, incluyendo una plataforma desplazable por el invernadero.
- Detección de problemas de posicionamiento del robot manipulador en invernadero.

Anexos

Fotografías de tomates en invernadero

Las fotografías de tomates en invernadero usadas en este proyecto de tesis fueron tomadas en los invernaderos de la Universidad Politécnica de Baja California, la cual es una institución pública del estado de Baja California que imparte educación superior en los niveles de licenciatura, especialización tecnológica y otros estudios de posgrado. Su ubicación es Avenida Claridad, Colonia Plutarco Elías Calles, 21376 Mexicali, B.C.

En total se obtuvieron 251 fotografías que se utilizaron para el análisis por tratamiento imágenes de las cuales se muestran 24 fotografías distribuidas en las Figuras A.2, A.3 y A.4 del presente anexo.



Figura A.1. Universidad Politécnica de Baja California.



(a) Fotografía 30.



(b) Fotografía 32.



(c) Fotografía 37.



(d) Fotografía 40.



(e) Fotografía 51.



(f) Fotografía 54.



(g) Fotografía 59.



(h) Fotografía 70.

Figura A.2. Fotografías extra de tomates en invernadero (Parte 1).



(a) Fotografía 111.



(b) Fotografía 120.



(c) Fotografía 131.



(d) Fotografía 136.



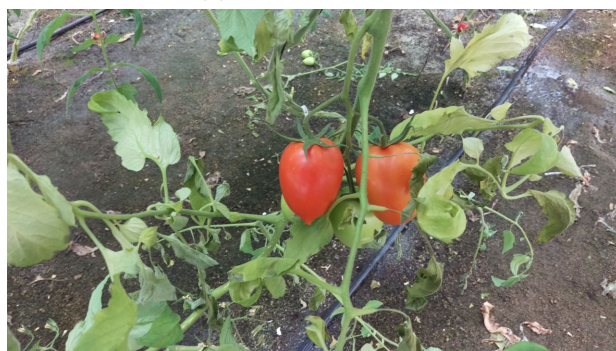
(e) Fotografía 151.



(f) Fotografía 191.



(g) Fotografía 201.



(h) Fotografía 227.

Figura A.3. Fotografías extra de tomates en invernadero (Parte 2).



(a) Fotografía 229.



(b) Fotografía 234.



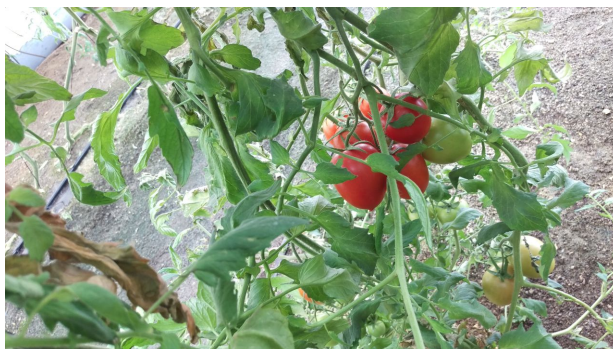
(c) Fotografía 236.



(d) Fotografía 242.



(e) Fotografía 244.



(f) Fotografía 246.



(g) Fotografía 250.



(h) Fotografía 251.

Figura A.4. Fotografías extra de tomates en invernadero (Parte 3).

Planos de construcción del sujetador recolector de tomates

En el presente anexo se muestran el plano en explosión (Figura B.1) y los planos con las vistas (Figuras B.2 y B.3) del sujetador diseñado para la recolección de tomates.

El material del cual se fabrica el sujetador puede ser ácido poliláctico (PLA) o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

El ácido poliláctico es un termoplástico biodegradable, hecho a base de recursos renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar. Aparte de usarse en la impresión 3D, puede ver principalmente en implantes médicos, envases de alimentos y vajillas desechables. El principal beneficio que presenta el filamento PLA es que es fácil de extruir.

El acrilonitrilo butadieno estireno es un termoplástico derivado del petróleo, que se encuentra comúnmente en sistemas de tuberías, en revestimientos de automóviles, en cascos y material didáctico para niños. Los objetos impresos con filamento ABS cuentan con una resistencia, flexibilidad y durabilidad ligeramente más elevadas que la de los objetos fabricados con filamento PLA, pero el proceso de impresión resulta más complicado y más costoso.

Para su uso en invernaderos, el sujetador debe contener esponja de polímero plástico en la parte interior de los dedos para evitar daños en el tomate al momento de sujetarlo y torcer el pedúnculo (una solución similar a la expresada en [50]). Además, debe contar con un recubrimiento de tela para evitar que el polvo del entorno de trabajo se introduzca en las articulaciones.

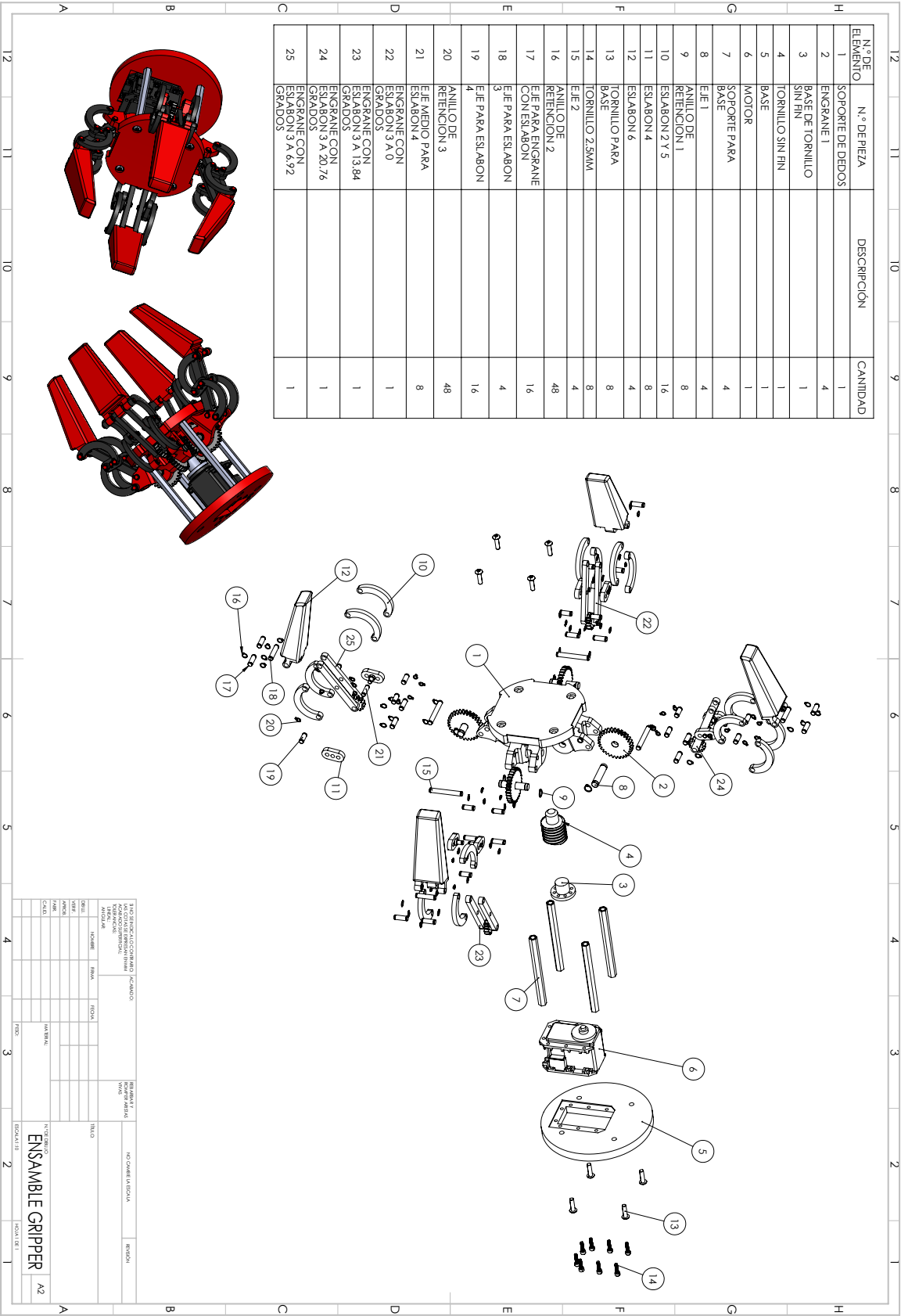


Figura B.1. Dibujo de explosionado del gripper.

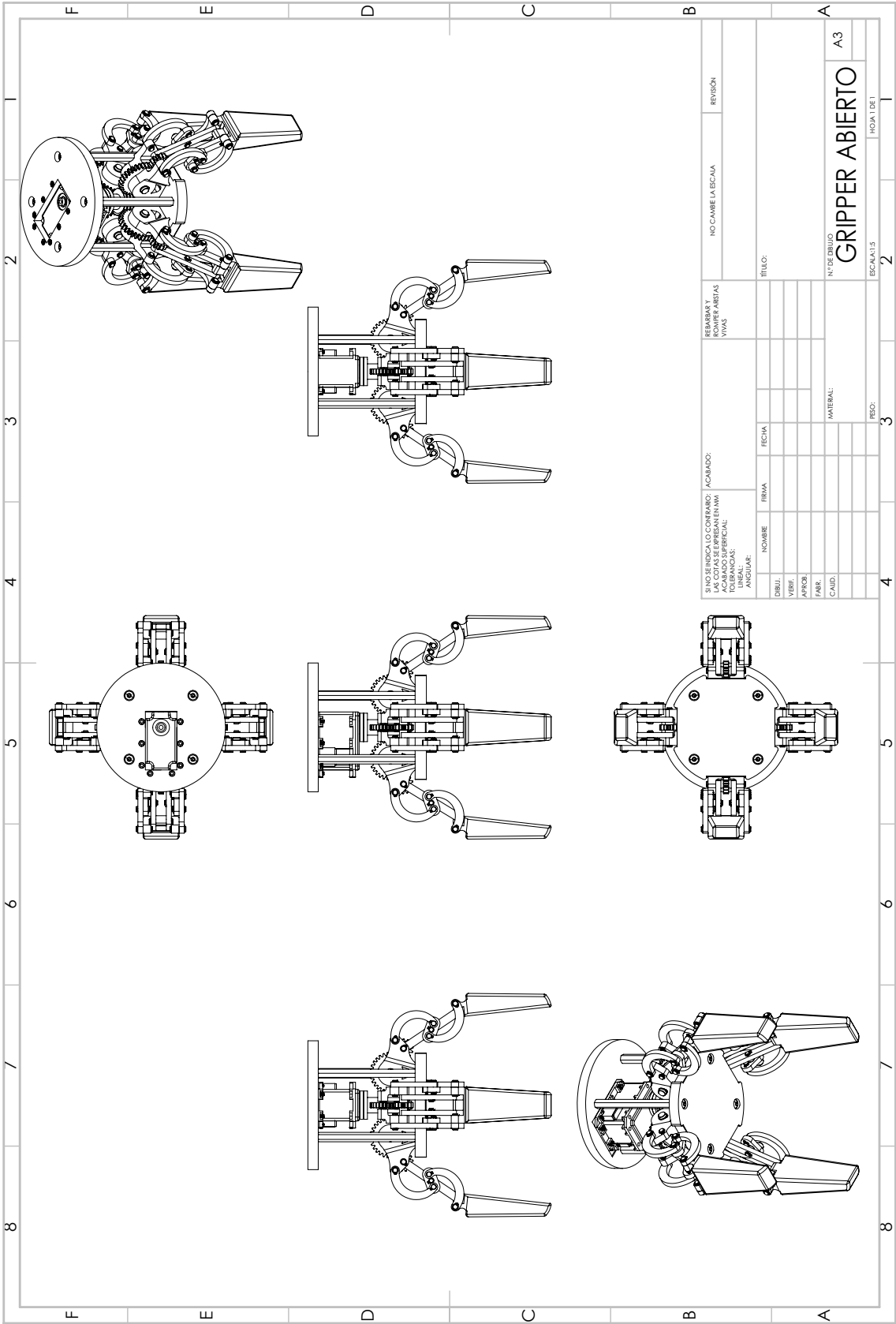


Figura B.2. Vistas del gripper abierto.

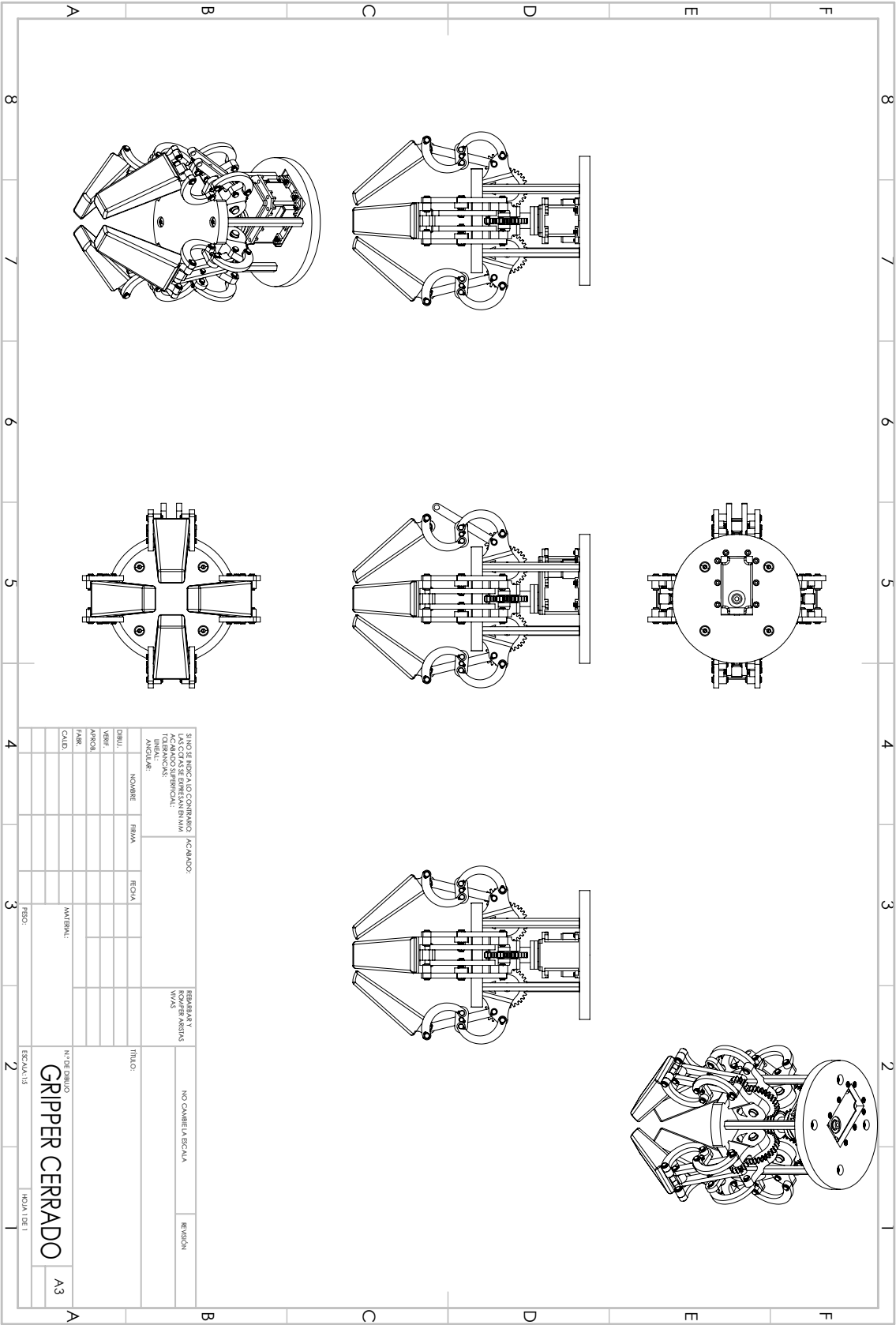


Figura B.3. Vistas del gripper cerrado.

Bibliografía

- [1] J. V. Cruz, “El avance de la automatización en la agricultura.” <http://www.redagricola.com/cl/el-avance-de-la-automatizacion-en-la-agricultura/>.
- [2] L. I. Avila-Martínez, “Sistema de apoyo para rehabilitación usando un robot industrial,” Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2012.
- [3] M. Spong y S. Hutchinson, *Robot Modeling and Control*. John Wiley and Sons, INC., 2005.
- [4] J. J. Craig, *Robotica*. PEARSON EDUCACIÓN, 2006.
- [5] A. 21XX, “Ifr report says: industrial robots market still growing rapidly.” <http://www.infoplcn.net/actualidad-industrial/item/103334-robot-industrial-record-ventas.>, 2018. [En línea; acceso Agosto-2018].
- [6] infoPLC.net, “Récord de ventas de robots industriales en 2015.” <https://www.expo21xx.com/news/ifr-report-industrial-robots-market/>.
- [7] D. de investigación y Evaluación Económica y Sectorial, “Tomate rojo 2016,” tech. rep., Fideicomisos instituidos en relación con la agricultura.
- [8] Interempresas.net, “El uso de robots en tareas agrícolas,” [En línea; acceso Julio-2018].
- [9] E. J. Van-Hente y J. Hemming, “An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses,” *Autonomous Robots*, vol. 13, pp. 241–158, 2002.

- [10] H. Yaguchi y K. Nagahama, "Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 652–657, 2016.
- [11] J. Hemming y C. Wouter-Bac, "A robot for harvesting sweet-pepper in greenhouses." International Conference of Agricultural Engineering, 2014.
- [12] P. Gil, T. Kisler, J. Garcia, C. Jara, y J. Corrales, "Calibración de cámaras de tiempo de vuelo: Ajuste adaptativo del tiempo de integración y análisis de la frecuencia de modulación," 2013.
- [13] S. B. Skaar, W. H. Brockman, y R. Hanson, "Camera-space manipulation," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 4, pp. 20–32, 1987.
- [14] S. B. Skaar, W. H. Brockman, y W. Jang, "Three-dimensional camera space manipulation," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 4, pp. 22–39, 1990.
- [15] S. B. Skaar, I. Yalda-Mooshabad, y W. H. Brockman, "Nonholonomic camera-space manipulation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 4, pp. 464–479, 1992.
- [16] E. J. González-Galván, F. Pazos-Flores, S. B. Skaar, y A. Cardenas-Galindo, "Camera pan/tilt to eliminate the workspace-size/pixel-resolution tradeoff with camera-space manipulation," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 18, no. 2, pp. 95–104, 2002.
- [17] E. J. González-Galván, S. R. Cruz-Ramírez, M. J. Seelinger, y J. J. Cervantes-Sánchez, "An efficient multi-camera, multi-target scheme for the three-dimensional control of robots using uncalibrated vision," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 19, no. 5, pp. 387–400, 2003.
- [18] E. J. González-Galván y S. B. Skaar, "Efficient camera-space manipulation using moments," in *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 3407–3412, IEEE, 1996.
- [19] J. M. Rendón-Mancha, A. Cárdenas, M. A. García, y B. Lara, "Robot positioning using camera-space manipulation with a linear camera model," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 726–733, 2010.
- [20] A. Ramirez, "Sistema de teleoperación sobre superficies arbitrarias con visión no calibrada," Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2018.

- [21] A. Loredó, “Control en velocidad, basado en visión, de un robot paralelo tipo delta,” Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2018.
- [22] F. Qingchun, W. Xiaonan, W. Guohua, y L. Zhen, “Design and test of tomatoes harvesting robot,” *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 949–952, 2018.
- [23] W. Peng, T. Arash, T. Hequn, y E. Reza, “A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 146, pp. 43–50, 2015.
- [24] Z. Fang, “Ripe tomato recognition with computer vision,” *International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference*, pp. 216–269, 2015.
- [25] G. Bradski y A. Kaehler, *Learning OpenCV*. OREILLY, 2008.
- [26] M. Cerdas-Araya y M. Montero-Calderón, *Manual de manejo poscosecha de tomate*. San José, C. R., 2002.
- [27] T. Suslow y M. Cantweel, “Tomate (jitomate): Recomendaciones para matener la calidad poscosecha,” *Convenio Postcosecha UCR-CNP*, pp. 25–26, 2001.
- [28] Y. Huang y K. Cheng, “Prediction of firmness parameters of tomatoes by portable visible and nearinfrared spectroscopy,” in *Journal of food engineering*, pp. 185–198, 2017.
- [29] F. Sermal, “Opencv tutorial c++.” <https://www.opencv-srf.com/2010/09/object-detection-using-color-seperation.html>.
- [30] D. Radic, “Color correction of monitor.” <https://informatics.buzdo.com/p357-color-correction.htm>.
- [31] OpenCV, “Canny edge detector.” https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/canny_detector/canny_detector.html, 2012. [En línea; acceso Junio-2018].
- [32] OpenCV, “Structural analysis and shape descriptors.” https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html, 2012. [En línea; acceso Junio-2018].
- [33] OpenCV, “Eroding and dilating.” https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/erosion_dilatation/erosion_dilatation.html, 2012. [En línea; acceso Junio-2018].

- [34] OpenCV, “Filling holes in an image using opencv.” <https://www.learnopencv.com/filling-holes-in-an-image-using-opencv-python-c/>, 2016. [En línea; acceso Junio-2018].
- [35] Y. Satoshi, S. Hayashi, Y. Hirotaka, y K. Kobayashi, “Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below,” *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, vol. 3, no. 48, pp. 466–469, 2014.
- [36] flexibleassembly, “Fanuc robotics lr mate 200ic | 6 axes robot with 704mm reach,” [En línea; acceso Agosto-2018].
- [37] D. Constantin y M. Lupoe, “Forward kinematic analysis of an industrial robot,” *New Developments in Mechanics and Mechanical Engineering*, pp. 90–95.
- [38] E. J. González-Galván, “Notas sobre teoría de estimación aplicada a la robótica.” Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Notas de curso, 2017.
- [39] E. J. Gonzalez-Galvan y S. B. Skaar, “Efficient camera-space manipulation using moments,” in *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 3407–3412, IEEE, 1996.
- [40] A. Muis y K. Ohnishi, “Eye-to-hand approach on eye-in-hand configuration within real-time visual servoing,” *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 10, pp. 404–410, 2005.
- [41] S. Hutchinson, G. D. Hager, y P. I. Corke, “A tutorial on visual servo control,” *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, vol. 12, pp. 651–670, 1996.
- [42] B. Goodwine, S. Michael, Seelinger. Steven, y M. Qun, “Nonholonomic camera space manipulation using cameras mounted on a mobile base,” *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems*, vol. 3523, pp. 258–267, 1998.
- [43] M. Hernández, B. Barrera, y L. Melgarejo, “Fisiología poscosecha,” in *Experimentos en fisiología y bioquímica vegetal*, pp. 169–170, 2010.
- [44] F. Beer y R. Johnston, *Mecánica de Materiales*. Mc Graw Hill, 2009.
- [45] R. C. Hibbeler, *Mecánica de Materiales*. Pearson Prentice Hall, 2006.
- [46] T. Wu y A. Judith, “Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices,” in *Postharvest Biology and Technology*, pp. 59–68, 2002.

- [47] M. Bernal-Torres y H. Medellín-Catillo, “Análisis, simulación y evaluación biomecánica de un mecanismo para prótesis de mano robótica,” *Memorias Del XXII Congreso De La Somim y XIV Congreso Iberomat*, pp. 1–10, 2016.
- [48] K. Telegenov, Y. Tlegenov, y A. Shintemirov, “A low-cost open-source 3-d-printed three-finger gripper platform for research and educational purposes,” *IEEE Access The Journal for rapid open access publishing*, vol. 3, pp. 638–647, 2015.
- [49] M. Salinas-Cobián, E. González-Galván, R. Bartali, A. Cárdenas, M. Maya, y A. González, “Sistema de visión cámara en mano aplicable a la automatización en producción agrícola,” Asociación Mexicana de Control Automático, 2018.
- [50] Y. Chiu, P. Yang, y S. Yeng, “Development of the end-effector of a picking robot greenhouse-grown tomatoes,” in *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 29, pp. 1001–1009, 2012.